

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

REGISTRO FOTOGRÁFICO DO ARCO E RELAÇÕES PARAMÉTRICAS TENSÃO/CORRENTE
DUAS METODOLOGIAS PARA O ESTUDO DA OTIMIZAÇÃO DA SOLDAGEM MIG/MAG

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

CARLOS EDUARDO ICONOMOS BAIXO

FLORIANÓPLIS, SETEMBRO DE 1990

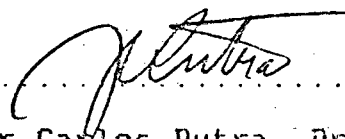
REGISTRO FOTOGRÁFICO DO ARCO E RELAÇÕES PARAMÉTRICAS TENSÃO/CORRENTE -
DUAS METODOLOGIAS PARA O ESTUDO DA OTIMIZAÇÃO DA SOLDAGEM MIG/MAG

CARLOS EDUARDO ICONOMS BAIXO

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

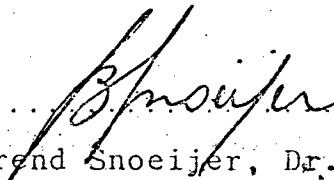
MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO FABRICAÇÃO,
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA



Jair Carlos Dutra, Dr. Eng.

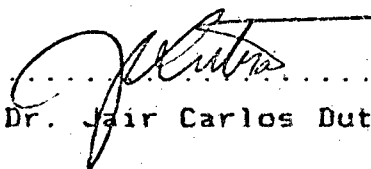
Orientador



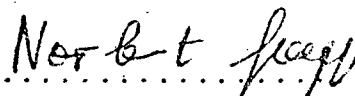
Berend Snoeijer, Dr. Ing.

Coordenador

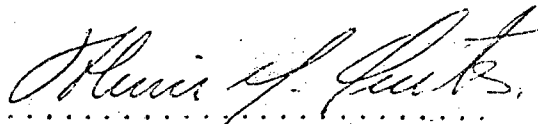
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Jair Carlos Dutra



Prof. Dr. Norbert Goepf



Prof. Dr. Almir M. Quites

AGRADECIMENTOS

À Mary, Almir, Letícia, Maria Lina e Juraci pela compreensão
e carinho dispensados ao longo deste trabalho;

Aos amigos do CPGEM, em especial, Fátima, Herman e Alexandre;

Ao Prof. Armando Albertazzi;

Ao pessoal do LABSOLDA;

À CNEN, pela concessão de auxílio financeiro.

	iv
ÍNDICE	iv
FIGURAS	vii
TABELAS	xi
SIMBOLOGIA	xii
RESUMO	xiii
ABSTRACT	xiv

CAPITULO 1	METODOLOGIAS ALTERNATIVAS PARA O ESTUDO DO PROCESSO MIG/MAG	1
1.1	OBJETIVOS DO TRABALHO	7
1.2	FUNDAMENTAÇÃO E MÉTODO	8
CAPITULO 2	ARCO VOLTAICO E TRANSFERÊNCIA METÁLICA NO PROCESSO MIG/MAG	12
2.1	ARCO VOLTAICO	12
2.1.1	Coluna do arco	15
2.1.2	Região catódica	17
2.1.3	Região anódica	22
2.2	INFLUÊNCIA DA ATMOSFERA PROTETORA NA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DO ARCO VOLTAICO	23
2.3	MECANISMOS RESPONSÁVEIS PELA TRANSFERÊNCIA	27
2.4	MODOS DE TRANSFERÊNCIA	36
2.5	REGULARIDADE DA TRANSFERÊNCIA POR CURTO-CIRCUITO	39
2.6	RADIAÇÃO LUMINOSA EMITIDA PELO ARCO VOLTAICO	41

CAPITULO 3	REGISTRO FOTOGRÁFICO: SISTEMA ÓTICO	44
3.1	PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO	45
3.2	FILTRO ESPACIAL	46
3.3	POLARIZADORES	50
3.4	FILTRO INTERFEROMÉTRICO	53
3.5	CÂMERA E LENTE FOTOGRÁFICA	55
3.6	DEMAIS ELEMENTOS UTILIZADOS NO SISTEMA	61
CAPITULO 4	REGISTRO FOTOGRÁFICO: PROCEDIMENTOS	64
4.1	ARCO VOLTAICO MIG/MAG	64
4.1.1	Ajuste da luminosidade	64
4.1.2	Variação na qualidade de imagem	72
4.1.3	Influência da luz de fundo	74
4.2	TRANSFERÊNCIA METÁLICA	79
4.3	ARCO TIG	80
4.4	REVELAÇÃO	84
CAPITULO 5	RELAÇÕES PARAMÉTRICAS TENSÃO / CORRENTE	86
5.1	DEFINIÇÃO DE COMPRIMENTO DO ARCO	86
5.2	DEFINIÇÕES E MÉTODOS ADOTADOS	88
5.3	REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS	92

5.4	RESULTADOS	97
5.4.1	Análise da metodologia para quantificação da regularidade	97
5.4.2	Resultados obtidos a partir da observação visual	102
5.5	ANÁLISE DOS RESULTADOS	105
5.6	COMPORTAMENTO DOS PARÂMETROS DPIP E DPTC DIANTE DA ALTERAÇÃO NA DINÂMICA DA FONTE DE ENERGIA	114
CAPITULO 6 PROCESSO MAG COM DUPLO FLUXO		120
6.1	CONSTRUÇÃO DO BOCAL	120
6.2	VERIFICAÇÃO DO EFEITO DE CONSTRIÇÃO	124
6.3	VERIFICAÇÃO DA REGULARIDADE DA TRANSFERÊNCIA	126
CAPITULO 7 CONCLUSÃO		135
7.1	SUGESTÕES PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	137
CAPITULO 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		139

FIGURAS

2.1	Distribuição espacial do arco voltaico gerado no processo TIG e MIG/MAG	13
2.2	Representação da distribuição espacial, potencial e corrente no arco voltaico	14
2.3	Zonas da coluna do arco	16
2.4	Distribuição espacial do arco voltaico MIG/MAG protegido por CO ₂ e argônio	24
2.5	Influência da corrente na formação da interface arco-ânodo	26
2.6	Variação na área de passagem da corrente no interior da gota	28
2.7	Variação da pressão ao longo da coluna do arco	31
2.8	Deslocamento característico da gota em transferência repulsiva	32
2.9	Comportamento da molécula de CO na atmosfera do arco voltaico	33
2.10	Distorção caminho da corrente provocado pelo aparecimento de uma força contrária à separação	34
2.11	Equilíbrio de forças atuantes sobre a gota metálica em atmosfera de CO ₂ e argônio	35
2.12	Representação dos modos de transferência metálica metálica no processo de soldagem MIG/MAG	36
2.13	Sequência de separação em transferência por curto-circuito	38
2.14	Efeito da corrente no espectro entre 4800 e 7.300 Å em arco de argônio e hélio	42
2.15	Efeito da corrente no espectro entre 4800 e 7.300 Å em arco de argônio e hélio	43
3.1	Esquema de montagem de um sistema ótico utilizando lâmpada de Xenônio	44
3.2	Esquema de montagem do sistema	46
3.3	Registro fotográfico do arco voltaico utilizando polarizadores e filtro espacial para redução da luminosidade do arco	46
3.4	Registro fotográfico com eliminação da luminosidade do arco pela incorporação de filtro interferométrico	47
3.5	Princípio de atenuação do filtro espacial	48

3.6	Recomendação de montagem do filtro espacial	49
3.7	Influência da abertura do diafragma da câmera no tamanho da imagem projetada no filme fotográfico	50
3.8	Princípio de atenuação dos polarizadores	51
3.9	Princípio de ajuste fino da luminosidade utilizado no sistema	52
3.10	Espectro da radiação próxima ao comprimento de onda do laser	54
3.11	Degeneração da imagem provocada por bandas de difração. Efeito produzido por desalinhamento do filtro espacial	55
3.12	Registro fotográfico obtido com objetiva de 55 mm	56
3.13	Alteração na distribuição da luminosidade a partir da inversão da lente	58
3.14	Influência do afastamento da câmera no tamanho da imagem projetada	59
3.15	Influência da distância focal da lente plano-convexa no diâmetro do feixe laser expandido	62
4.1	Registro fotográfico apresentando superexposição da imagem	65
4.2	Reperesentação da distribuição da luminosidade incidente sobre a câmera fotográfica	66
4.3	Registro fotográfico do arco voltaico MIG/MAG. Período de exposição: recomendado: 1 ms utilizado: 0.25 ms. Afastamento da câmera: 180 mm	68
4.4	Registro fotográfico do arco voltaico MIG/MAG. Período de exposição: recomendado: 1 ms utilizado: 0.25 ms. Afastamento da câmera: 180 mm	68
4.5	Registro fotográfico do arco voltaico MIG/MAG. Período de exposição: recomendado: 1 ms utilizado: 0.25 ms. Afastamento da câmera: 300 mm	70
4.6	Registro fotográfico do arco voltaico MIG/MAG. Período de exposição: recomendado: 1 ms utilizado: 0.25 ms. Afastamento da câmera: 300 mm	70
4.7	Efeito do aumento no fator de ampliação sobre a distribuição da luminosidade incidente sobre a câmera	71
4.8	Variação na qualidade de imagem dos resultados	73

4.9	Registro fotográfico do arco voltaico sem a presença da luz de fundo	76
4.10	Registros fotográficos da transferência metálica no instante do curto-circuito	78
4.11	Sequência de registros fotográficos da transferência metálica no processo MIG/MAG	80
4.12	Registro fotográfico do arco TIG sem a presença da luz de fundo	81
4.13	Variações nas dimensões do arco voltaico em função do período de exposição	82
4.14	Relação entre período de exposição e dimensões da imagem	83
5.1	Definição clássica do comprimento do arco	87
5.2	Esquema comparativo entre a situação real e a simplificação do comprimento do arco	87
5.3	Efeito de redução no comprimento do arco em transferência por projétil	89
5.4	Oscilogramas de tensão e corrente em transferência por projétil	89
5.5	Efeito de redução no comprimento do arco em transferência por curto-circuito	91
5.6	Oscilogramas de tensão e corrente em transferência por curto-circuito	91
5.7	Parâmetros representativos da regularidade	93
5.8	Esquema de montagem do sistema para medição do comprimento do arco	94
5.9	Curva de calibração do sistema de medição	96
5.10	Distribuição de DPIP e DPTC em função da tensão média de soldagem	98
5.11	Correlação entre DPIP e as características do cordão depositado	99
5.12	Efeito da tensão média na distribuição de DPTT. Resultados obtidos por Lucas	100
5.13	Efeito da tensão média na distribuição de DPTT. Resultados obtidos por Lucas	101
5.14	Distribuição de DPTT em função da tensão média de soldagem	101
5.15	Variação no diâmetro de gota calculado em função da tensão média de soldagem	103
5.16	Variação no diâmetro de gota calculado em função da tensão média de soldagem	104

5.17	Produção de salpicos finos como decorrência da explosão da ponte de ligação	106
5.18	Aparecimento da força eletromagnética contrária à separação em função de uma densidade de corrente convergente	107
5.19	Faixa operacional de soldagem para as condições em que se realizaram os ensaios	113
5.20	Relação entre velocidade de alimentação do arame e corrente para as condições de ensaio	113
5.21	Oscilogramas típicos de corrente	115
5.22	Histogramas típicos de tempo de curto	115
5.23	Distribuição de DPTC em função da tensão média de soldagem	116
5.24	Aspecto do cordão depositado	116
5.25	Distribuição de DPIP em função da tensão média de soldagem	117
6.1	Diagrama esquemático do processo MAGDF	120
6.2	Efeito da proporção de argônio na produção de salpicos	122
6.3	Produção de salpicos nos processos MAGDF, MAG e CO ₂	122
6.4	Esquem com bocal com duplo-fluxo	123
6.5	Distribuição de DPIP em função da tensão média de soldagem	117
6.6	Aspecto do cordão depositado pelo processo MAGDF	130
6.7	Distribuição de DPIP em função da tensão média de soldagem	131
6.8	Aspecto do cordão depositado pelo processo MAGDF	131

TABELAS

2.1	Classificação do IIW para os modos de transferência metálica aplicáveis ao processo de soldagem MIG/MAG	36
5.1	Condições de realização dos ensaios (MAG/C25)	92
5.2	Resultados de calibração da escala de medição	95
6.1	Condições de realização dos ensaios (MAGDF)	126
6.2	Variáveis de análise selecionadas	127
6.3	Valores (médios) dos parâmetros de transferência encontrados em cada processo (MAGDF e MAG/C25) Variável de análise: corrente média (80 A)	129
6.4	Valores (médios) dos parâmetros de transferência encontrados em cada processo (MAGDF e MAG/C25) Variável de análise: velocidade do arame (4 m/min)	130

SIMBOLOGIA

MIG - Metal Inert Gas

MAG - Metal Active Gas

TIG - Tungsten Inert Gas

I_p - Valor instantâneo do pico de corrente;

MP - Média dos valores de I_p ;

DPI - Desvio padrão dos valores de I_p ;

TT - Tempo de transferência;

DPTT - Desvio padrão dos valores de TT;

TC - Tempo modal de curto-circuito;

DPTC - Desvio padrão dos valores de TC;

DM - Diâmetro modal das gotas metálicas;

L - Comprimento aparente do arco;

L' - Comprimento real do arco;

RM - Resultado da medição;

SISDATASOLDA - Sistema de controle de variáveis e aquisição
de dados;

MAGDF - Processo MAG alimentado com duplo fluxo de gás.

RESUMO

Relata-se o desenvolvimento de duas técnicas que se destinam à análise da transferência metálica no processo de soldagem MIG/MAG. A primeira consiste na montagem de um sistema ótico para possibilitar a observação visual e aquisição de imagens do arco voltaico e transferência metálica. A segunda técnica consiste na definição de uma metodologia para a determinação de relações paramétricas tensão/corrente em transferência metálica por curto-circuito. Apresenta-se a aplicação destas duas técnicas no estudo de características do arco voltaico e transferência metálica no processo MAG com alimentação de gás de proteção feita por um duplo fluxo composto por argônio e CO_2 .

ABSTRACT

The development of two technics for gas metal arc welding metal transfer analysis are described. The first is an optical system to allow visual observation and images acquisition of arc and transference of metal drops. The second technic involves the definition of a methodologie for establishing voltage-current parametric relationships for short circuiting arc operation. The application of these two technics for study arc and metal transfer characteristics of double shielding gas metal arc welding are presented.

1 METODOLOGIAS ALTERNATIVAS PARA O ESTUDO DO PROCESSO MIG/MAG

Inicialmente desenvolvido para ser utilizado na soldagem de alumínio, nas últimas décadas o processo MIG/MAG tem se convertido em um método de manufatura eficiente para a produção dos mais variados tipos de estruturas soldadas [1]. As razões que conduziram ao interesse de aprimorar o processo se baseiam em vantagens operacionais como [2]:

- elevada quantidade de material depositado por tempo
(Kg de solda / hora);
- possibilidade de mecanização do processo;
- elevado ciclo de operação (tempo de arco aberto / tempo total de produção);
- possibilidade de utilização em robos.

Embora hoje o processo MIG/MAG seja considerado uma técnica de manufatura eficiente, a impossibilidade de um controle efetivo sobre a transferência metálica contribuiu em muito para a sua não utilização em várias aplicações industriais. Esta falta de controle, induzida principalmente pela inexistência de fontes de energia apropriadas às características do processo, impingiu a este uma imagem negativa perante seus usuários, que passaram a considerá-lo um processo " temperamental " e suscetível ao aparecimento de defeitos de fusão. Nos últimos vinte anos, tem ocorrido a reversão deste quadro em função dos avanços tecnológicos incorporados aos equipamentos de soldagem. A introdução, no mercado, de fontes de energia utilizando semi-condutores permitiu a adoção de metodologias de controle da

transferência com base na realimentação do processo com informações fornecidas pelas próprias variáveis de soldagem [3]. Estes sistemas de controle renovaram o interesse pela utilização do processo, ao torná-lo menos suscetível ao aparecimento de falhas no cordão.

Em uma soldagem manual, o aparecimento de qualquer perturbação que venha a causar irregularidades no cordão pode ser corrigido em tempo hábil pelo soldador. Sob o ponto de vista funcional, o soldador corresponde, entre outras funções, ao elemento responsável pelo controle do processo de soldagem, permitindo que a deposição de metal se mantenha na forma desejada. Nos sistemas mecanizados ou automatizados, a introdução dos sistemas de controle tem por objetivo criar, via circuitos eletrônicos, uma forma similar de realimentação do processo. A função básica destes sistemas é a de ajustar, automaticamente, a potência elétrica da fonte de energia a uma dada velocidade de alimentação do arame ou tensão de soldagem. Para esta finalidade, várias concepções de sistemas de controle tem sido formuladas [4,5,6,7,8], constituindo um tópico à parte no estudo da automação da soldagem MIG/MAG.

Dentre as várias abordagens que podem ser feitas sobre os sistemas de controle destinados à soldagem MIG/MAG [5,6], comenta-se àquela que envolve a física do processo. Em qualquer modo de transferência, seja por curto-circuito ou por projétil, para que a deposição se dê de forma eficiente dois requisitos fundamentais devem ser satisfeitos [9]:

a) sempre deverá haver equilíbrio entre a velocidade com que o eletrodo é introduzido no arco e sua velocidade de fusão afim de evitar a ocorrência de " stubbing ", onde o eletrodo sólido toca a

peça provocando a extinção definitiva do arco, ou " burnback ", onde o eletrodo funde de maneira excessivamente rápida, provocando a fusão do bico de contato;

b) a transferência metálica deve se dar com gotas de tamanho pequeno, aproximadamente do mesmo diâmetro do eletrodo.

Para garantir que durante a execução do cordão estes requisitos sejam cumpridos, os sistemas de controle se baseiam em relações paramétricas envolvendo tensão e velocidade de alimentação do arame (ou corrente), definidas experimentalmente segundo critérios pré-estabelecidos.

Usualmente encontra-se referência à utilização de curvas características estáticas como forma de expressar a relação funcional entre tensão e corrente de soldagem [9,5]. Por definição, as curvas características estáticas do arco compreendem a associação de pares tensão-corrente para um comprimento de arco específico. Além de utilizadas para o controle do processo de soldagem, aplicam-se estas curvas como ferramentas de apoio à definição de procedimentos de soldagem. Informações concernentes a regulagem da fonte de energia, correlação entre potência elétrica e taxa de fusão de eletrodo são aspectos que podem ser determinados por seu intermédio.

Embora o processo MIG/MAG já incorpore muitos avanços, propostas que visam melhorar o desempenho do processo ainda estão no plano teórico. Para que estas propostas sejam implementadas, torna-se necessário o conhecimento de informações específicas acerca do comportamento do arco voltaico e da transferência metálica. A viabilização deste estudo exige, muitas vezes, informações adicionais àquelas fornecidas apenas pela análise

oscilográfica de tensão e corrente de soldagem. Neste contexto, a aquisição de imagens do arco voltaico e da transferência metálica assume importância fundamental. Estes registros permitem visualizar e armazenar informações dos fenômenos existentes no processo de soldagem. Informações desta natureza permitem ampliar as bases de conhecimento objetivando um incremento na produção e na qualidade dos cordões de solda, através de melhor definição do procedimento de soldagem e de projeto mais adequado para a fonte de energia.

A utilização de registros visuais para o estudo da física dos processos de soldagem a arco tem aplicação difundida. Na literatura técnica encontram-se referências à utilização destes registros no estudo dos processos a arco submerso, eletrodo revestido, TIG e MIG/MAG. O interesse de cada pesquisa abrange objetivos diversos como:

- comportamento do arco voltaico;
- formação da gota metálica, velocidade e aceleração durante a transferência;
- formação da poça de fusão e sua influência na transferência metálica e geometria do cordão.

Em sua maioria, os sistemas óticos destinados à aquisição de imagem do arco voltaico empregam em suas configurações câmeras fotográficas de alta velocidade, permitindo, com isto, obter frequências de aquisição de imagem superiores a 1000 quadros por segundo. Apesar de seu elevado custo, a opção por estas câmeras se dá em função da necessidade de obtenção de frequências de aquisição superiores a de variação da grandeza sob análise. Dependendo do objetivo do estudo, frequências de aquisição da

ordem de 1000 a 4000 quadros por segundo são necessárias, em especial quando o objetivo do estudo envolver análise dos mecanismos de transferência metálica.

Encontram-se na literatura referências a sistemas que executam a medição dos valores de tensão e corrente de soldagem concomitantemente à execução dos registros fotográficos. Estas configurações são extremamente úteis, pois permitem verificar a influência recíproca entre as variáveis elétricas do processo e a formação do arco voltaico e transferência metálica. Em uma montagem empregada para o estudo da transferência em eletrodos revestidos [10], o sistema ótico que executa as aquisições de imagem do arco também realiza a aquisição dos valores de tensão e corrente, registrando estas informações em película fotográfica. Para tanto, foi incorporado à câmera fotográfica uma segunda lente objetiva para permitir o registro dos sinais de tensão e corrente captados da tela de um osciloscópio. Desta maneira, a cada quadro há o registro visual do processo acompanhado dos valores de tensão e corrente de soldagem. Na montagem desenvolvida por Dorn [11] são utilizados dois sistemas paralelos para realizar estas aquisições. Enquanto um sistema ótico registra a imagem do arco em película fotográfica, um sistema de aquisições de sinais controlado por computador realiza as medições dos valores instantâneos de tensão e corrente de soldagem. A correlação entre as variáveis elétricas e os registros fotográficos individuais é obtido pelo sincronismo das frequências de aquisição dos dois sistemas empregados. Pelo que se pôde observar, ambos os sistemas apresentam vantagens e limitações. No primeiro sistema, os valores de tensão e corrente registrados correspondem exatamente ao período de aquisição da imagem. Contudo, apesar desta garantia, para determinação dos

valores instantâneo torna-se necessário converter o sinal registrado na película em valor numérico. Já no segundo sistema, a determinação dos valores instantâneos pode ser feita de maneira direta através do processamento matemático via computador. Nestes sistemas, o ponto crítico compreende a necessidade de obtenção de um perfeito sincronismo entre as frequências de aquisição dos dois sistemas empregados.

Apesar das câmeras fotográficas de alta velocidade ainda exercerem supremacia em utilização, tem-se buscado novos instrumentos para o registro de imagens. Neste sentido, as câmeras CCD (charged couple device) apresentam um futuro promissor em função das vantagens que oferecem relação às câmeras de alta velocidade [12]:

- período de aquisição da imagem bem mais prolongado, pois os registros são armazenados em fitas magnéticas de longa duração;
- permitem ainda uma visualização instantânea da imagem, que pode ser feita via monitor de vídeo;
- dispensam os processos de revelação, obrigatoriedade encontrada quando da utilização de películas fotográficas.

Embora apresente vantagens irrefutáveis, a principal limitação à utilização destes instrumentos se situa na baixa frequência de aquisição de imagem, limitada a aproximadamente a 300 quadros por segundo, o que limita a utilização destes elementos onde estas velocidades são viáveis. Além deste aspecto, as câmeras CCD apresentam grande susceptibilidade ao aparecimento de ruídos no sinal de gravação [13], o que tende a reduzir a qualidade dos resultados.

1.1 OBJETIVOS DO TRABALHO

Situando este trabalho dentro de um tema amplo como é o estudo da automação da soldagem MIG/MAG, pretende-se apresentar uma contribuição através do desenvolvimento e aplicação de um ferramental que se destina, em primeira estância, a dominar o conhecimento sobre a física do processo para, a partir deste domínio, viabilizar propostas de automação.

Os objetivos que se pretende alcançar com este trabalho são:

a) o desenvolvimento de um sistema ótico onde se procura utilizar fonte laser para possibilitar a observação visual e aquisição de registros fotográficos do arco voltaico e da transferência metálica;

b) a definição de um procedimento que permita a determinação de relações paramétricas tensão/corrente com o processo operando no modo de transferências por curto-circuito;

c) procurar analisar características do arco voltaico e da transferência metálica no processo MAG com proteção de gás composta por um duplo fluxo gasoso.

Impõem-se, desta forma, a segmentação do trabalho em partes bem definidas que, juntas, viabilizam os objetivos propostos.

1.2 FUNDAMENTAÇÃO E MÉTODOS

O desenvolvimento de qualquer proposta visando a automação da soldagem MIG/MAG passa, obrigatoriamente, pelo estudo das características físicas do processo, o que exige muitas vezes, o desenvolvimento de instrumentação dedicada as características do processo que se deseja analisar. Neste trabalho procura-se desenvolver e aplicar metodologias que venham a permitir aprimorar o estudo destas características.

As razões que motivaram este trabalho, e a metodologia que se pretende utilizar em seu desenvolvimento, são:

- a) desenvolvimento de um sistema ótico para o registro fotográfico do arco voltaico

Busca-se o desenvolvimento de um sistema ótico para permitir o registro fotográfico de fenômenos relacionados ao arco voltaico MIG/MAG que seja simples, mas que permita registrar as características dinâmicas do processo. Pretende-se desenvolver este sistema visando sua futura incorporação ao sistema de controle de variáveis e aquisição de dados (SISDATASOLDA) [8]. Uma vez que o sistema ótico esteja implementado, o SISDATASOLDA terá ampliada sua capacidade de análise do processo de soldagem, pois serão criadas as possibilidades de correlacionar as variáveis elétricas do processo com os registros fotográficos do arco.

Na etapa de desenvolvimento proposta, procura-se definir e analisar os requisitos básicos de montagem deste sistema, através da seleção dos componentes a serem utilizados, assim como os requisitos necessários à execução dos registros fotográficos.

Pretende-se com uma câmera fotográfica convencional simular todas as características exigidas para a filmagem a alta velocidade. Espera-se, desta forma, verificar a capacidade do sistema de reproduzir as condições de luz exigidas para a execução dos registros fotográficos com períodos de exposição da ordem de 0.25 ms. A não implementação imediata do sistema ótico ao SISDATASOLDA faz-se em função da não disponibilidade da câmera fotográfica de alta velocidade. A implementação definitiva só poderá ser feita a partir do momento que se dispuser desta câmera.

b) definição de um procedimento experimental para determinação de relações paramétricas tensão/corrente

A determinação de um procedimento aplicado à determinação de relações paramétricas entre tensão e corrente de soldagem assume grande importância para o processo operando em condições de transferência por curto-circuito. Isto se justifica no fato do arco voltaico sofrer uma alteração em seu comprimento a cada gota formada, o que impõem um elevado grau de dificuldade para a determinação desta grandesa. Além deste aspecto, a transferência por curto-circuito exige que se forneça ao processo uma perfeita combinação de parâmetros e variáveis de soldagem, de maneira a resultar em uma transferência com regularidade.

Busca-se neste trabalho analisar as particularidades existentes na transferência por curto-circuito, de maneira a definir uma metodologia que se aplique a determinação das relações paramétricas entre tensão e corrente para este modo de transferência. Para esta determinação, procura-se utilizar uma metodologia fundamentada na análise oscilográfica das variáveis

tensão e corrente para obtenção de parâmetros indicativos da transferência.

c) Análise de características do arco voltaico e transferência metálica no processo MAG com duplo fluxo gasoso

No processo MIG/MAG, a atmosfera onde o arco voltaico se forma provém de uma fonte externa, sendo introduzida na região do arco pelo bocal da pistola. Além de fornecer o ambiente para a formação do arco, o gás possui a função adicional de proteção da poça de fusão. Em sua configuração original, a alimentação de gás no processo MAG se dá através de um bocal único. Quando a atmosfera se compõem de argônio e CO_2 , estes são introduzidos no bocal na forma de uma mistura, cuja composição varia de acordo com as exigências da operação de soldagem.

O processo MAG com duplo fluxo de proteção consiste em uma variante do processo MAG convencional. O aspecto que o caracteriza como variante é a forma construtiva do bocal, que permite injetar na região do arco atmosferas de argônio e CO_2 de forma separada em lugar de uma atmosfera única composta pela mistura destes gases. Ao ser desenvolvido, o processo MAG com duplo fluxo buscou aliar as vantagens oferecidas pela soldagem sob atmosferas de argônio e CO_2 no estado puro.

O estudo envolvendo o processo MAG com duplo fluxo destina-se a determinar a influência que a alimentação separada de argônio e CO_2 exerce sobre o arco voltaico e transferência metálica. Como este processo é relativamente novo, ainda não se estabeleceu uma base de conhecimentos equivalente à existente para o processo MAG alimentado por mistura de gases. Ao procurar levantar informações

sobre o arco voltaico e transferência metálica com proteção gasosa formada por um duplo fluxo, espera-se correlacioná-las com o processo alimentado com mistura gasosa, de maneira a traçar um paralelo entre os dois processos. Em se tratando de um processo de soldagem, onde o campo de análise pode assumir dimensões muito grandes, restringir-se-á os ensaios a algumas condições específicas, de maneira a não estender demasiadamente o número de experimentos. Como ferramentas para o estudo do arco voltaico e transferência metálica, procura-se utilizar o sistema ótico para o registro fotográfico, assim como os procedimentos a serem definidos para a determinação das curvas características estáticas do arco.

2 ARCO VOLTAICO E TRANSFERÊNCIA METÁLICA NO PROCESSO MIG/MAG

A revisão bibliográfica aqui apresentada não pretende se constituir em uma análise completa sobre as características físicas do arco voltaico gerado no processo de soldagem MIG/MAG. Com aspirações muito mais modestas, pretende-se apenas apresentar alguns aspectos básicos de todo o universo de conhecimento que envolve o estudo do arco voltaico. O objetivo fundamental é o de fornecer subsídios que auxiliem na compreensão de características do arco voltaico e da transferência metálica no processo de soldagem MIG/MAG, na avaliação de considerações feitas acerca da realização dos experimentos, assim como na análise dos resultados obtidos nos ensaios.

2.1 ARCO VOLTAICO

Em sua definição mais geral, o arco voltaico pode ser considerado como um condutor elétrico gasoso que converte energia elétrica em calor e luz [14]. Valendo-se destas propriedades, foram desenvolvidos dispositivos e processos de fabricação que se utilizam do arco voltaico para produzir calor ou luz [15]. Dentro destas aplicações tecnológicas, encontra-se um grupo de processos de soldagem que utilizam o arco voltaico como fonte geradora de calor para a fusão de metal. Eletrodo revestido, arco submerso e MIG/MAG, entre outros tantos, são exemplos bem conhecidos deste grupo. Nestes processos, o arco voltaico compõe-se por descargas elétricas de baixa tensão e elevada densidade de corrente, conduzidas por meio de um plasma gerado em um gás a alta

temperatura. A distribuição tridimensional com que o plasma se estabelece no espaço intereletrodos permite que se atribua ao arco voltaico geometrias características. Como exemplo, arcos que se formam em cátodos de tungstênio se caracterizam por possuir uma distribuição espacial em forma de sino (fig. 2.1-a). Já em eletrodos de ferro, caso típico do processo MIG/MAG, o arco voltaico assume uma distribuição espacial em forma de tronco de cone (fig. 2.1-b).

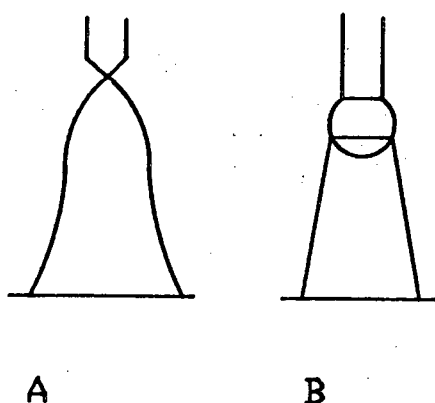


Figura 2.1 - Distribuição espacial do arco voltaico gerado no processo (a) TIG e (b) MIG/MAG [14].

Em termos de estrutura física, o arco voltaico pode ser sub-dividido em três regiões elementares [16] - (fig. 2):

- região da queda de tensão catódica (VTC);
- coluna do arco;
- região da queda de tensão anódica (VTA).

As regiões da queda de tensão anódica e catódica (Fig. 2.2-a) se constituem nas interfaces do arco voltaico com o ânodo e cátodo, respectivamente. Apesar de possuírem dimensões físicas muito pequenas, aproximadamente da ordem de 10^{-2} mm [16], estas regiões são responsáveis por uma parcela significativa da queda de tensão do arco (= 10 V) - (fig. 2-b). A intensidade que o campo

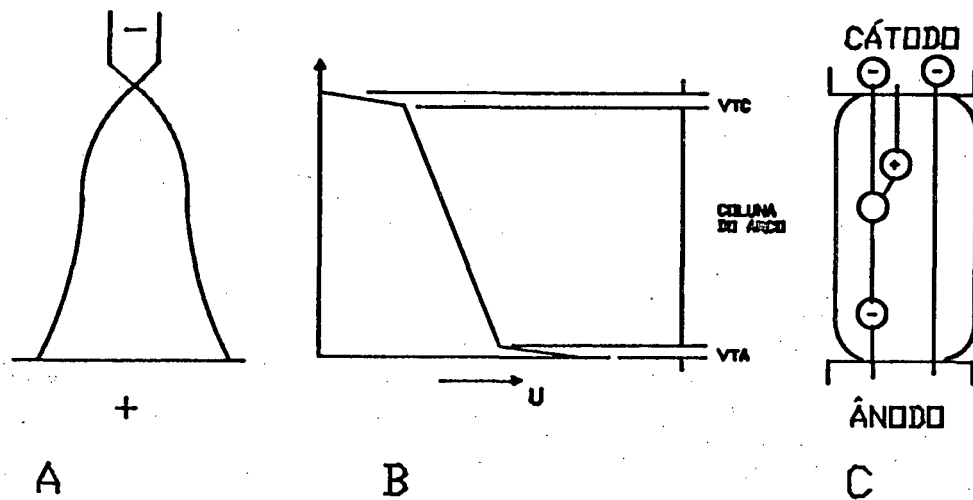


Figura 2.2 - Representação da distribuição (a) espacial, (b) potencial e (c) corrente no arco voltaico [14,16].

elétrico atinge nestas regiões confere a estas uma participação significativa no mecanismo de ionização do plasma. Após a abertura do arco, elétrons emitidos a partir do cátodo, a alta temperatura, são acelerados na região de queda de tensão catódica em direção ao ânodo. Neste trajeto, parte da energia cinética adquirida é liberada em colisões com átomos e moléculas presentes na coluna do arco. Como resultado destas colisões, além da produção de mais íons e elétrons, há liberação de calor para o meio, auxiliando, com isto, na manutenção do estado de ionização do gás. Em sua trajetória final, os elétrons se chocam contra o ânodo, liberando energia na forma de calor (fig. 2.2-c). No sentido oposto, os íons positivos produzidos no plasma são conduzidos em direção ao eletrodo negativo. Ao colidirem com a superfície do cátodo, liberam energia na forma de calor, mantendo o cátodo a uma temperatura elevada e auxiliando na manutenção da emissão de elétrons. Neste mecanismo de emissão, temperatura e intensidade do

campo elétrico exercem um papel de grande importância. Embora não se conheça completamente a forma como se dá esta produção, acredita-se que a emissão termoiônica, controlada pela temperatura, e emissão de campo, controlada pela intensidade do campo elétrico da região de queda de tensão catódica, sejam os mecanismos responsáveis pela total emissão de elétrons que fluem para o interior do arco [17].

Em uma análise mais profunda sobre a estrutura física do arco voltaico, poderia-se subdividir as regiões da queda de tensão catódica e anódica em regiões mais elementares. Embora esta abordagem mais minuciosa permita estender o conhecimento sobre o arco voltaico, para sua implementação seria necessário introduzir informações que envolvem princípios físicos bastante complexos e que ainda não formam uma base de informações confiável. Por este motivo, considerou-se, nesta análise, a existência de apenas três regiões, denominadas de região catódica e região anódica, que englobam as interfaces do arco e a própria superfície dos eletrodos, além da própria região da coluna do arco.

2.1.1 Coluna do Arco

Sob todos os aspectos que envolvem a física do arco voltaico, é sobre a região da coluna do arco que se concentra o maior volume de conhecimento acumulado. Apesar de se correlacionarem com a natureza do material que compõe o cátodo, muitos dos princípios físicos encontrados na coluna do arco podem ser considerados, em essência, os mesmos para cátodos refratários e não-refratários. No que se refere ao processo MIG, muito do conhecimento adquirido provem de estudos realizados em arcos com cátodo de tungstênio.

A região da coluna do arco compõe-se de três zonas distintas [18,19,21,22]- (fig. 2.3):

- núcleo do arco elétrico;
- Arco elétrico;
- Chama do arco.

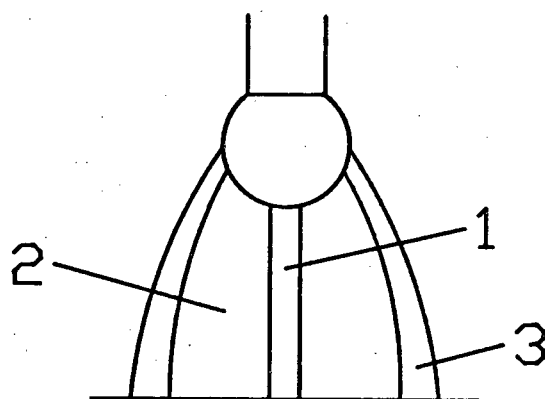


Figura 2.3 - Zonas da coluna do arco : 1 - coluna de plasma; - 2 - arco elétrico; 3 - chama do arco [18,19].

O núcleo do arco corresponde a região mais interna da zona do arco elétrico, sendo formada por uma coluna gasosa no estado de completa ionização. Nesta zona, a temperatura encontra seu valor máximo, que decai gradualmente à medida que se afasta do núcleo em direção à periferia do arco voltaico. O contato com o ambiente externo promove uma perda de calor da coluna de gás para o meio, impedindo que a zona do arco elétrico mantenha o estado de completa ionização. Além da atmosfera gasosa, o arco voltaico contém material proveniente da vaporização de partículas dos eletrodos, decorrência direta do intenso aquecimento provocado pelas descargas elétricas. A terceira zona do arco voltaico aparece envolvendo a zona do arco elétrico, sendo denominada de chama do arco. Esta zona compõe-se quase que inteiramente por gás

de proteção em estado de plasma com menor excitação. Das três zonas que compõe o arco voltaico, a de maior importância é a do arco elétrico, em razão de ser nesta onde se concentra a maior parcela de corrente que circula pelo arco voltaico.

2.1.2 Região Catódica

Assume importância na formação e manutenção do arco voltaico por ser a região onde se concentra a emissão de elétrons que fluem para o interior do arco. A quantidade de elétrons produzidos na região catódica influi diretamente na distribuição espacial do arco voltaico, na regularidade do processo de transferência e na própria característica do cordão depositado.

Dentre os aspectos de interesse ao estudo da emissão de eletrons comenta-se, inicialmente, o conceito de uma propriedade do reticulado cristalino denominada função de trabalho. Segundo a teoria eletrônica, a propriedade função de trabalho procura quantificar, da mesma forma que o potencial de ionização, a energia necessária para remover eletrons de um átomo. O conceito de função de trabalho deriva de uma teoria formulada por Einstein. Este demonstrou que a incidência de radiação eletromagnética sobre um átomo pode fornecer energia suficiente para promover a liberação de eletrons. Segundo esta teoria, a energia cinética máxima adquirida pelos eletrons emitidos a partir da incidência de radiação é quantificada pela relação:

$$E_2 = E_1 - w \quad (1)$$

onde E_2 é a energia cinética máxima dos eletrons livres, E_1 a energia da radiação incidente e w a parcela associada a energia de

atração dos eletrons. A esta parcela de energia Einstein denominou função de trabalho e representa, essencialmente, a energia necessária para produzir um eletron com energia cinética zero. A medida de energia quantificada pela função de trabalho equivale a energia de ligação de um dos muitos eletrons liberados da superfície do emissor.

Potencial de ionização esta associado a quantidade de energia necessária para elevar um eletron de um átomo de um nível energético baixo a outro mais elevado. Considerando um átomo em seu estado fundamental, ou seja, com todos os seus eletrons, a medida de energia quantificada pelo potencial de ionização corresponde aquela necessária à liberação do eletron mais externo. Para promover o deslocamento de mais eletrons, novos potenciais são encontrados, recebendo não mais a denominação de potencial de ionização, mas de potenciais de ressonância. Por apresentarem periodicidade com relação ao número atômico, o potencial de ionização é normalmente associado a reatividade do átomo. Quanto maior o potencial de ionização, maior a dificuldade para que este reaga com outros elementos.

Para efeito de estudo de emissão de eletrons em cátodos, acredita-se que o conceito de função de trabalho se torne mais apropriado, uma vez que esta teoreia assume que os eletrons dos cristais metálicos possuem maior liberdade de movimentação, podendo circular de forma mais livre por entre os átomos. Este pressuposto conduz a níveis de energia de atração inferiores aqueles definidos pelo potencial de ionização. Seguindo a tendência da literatura que aborda a teoria do arco voltaico, adota-se neste trabalho o conceito de função de trabalho como parâmetro de referência da energia necessária para a remoção de eletrons da região catódica.

A capacidade de emissão de elétrons por um metal depende tanto de sua função de trabalho quanto da temperatura de operação do arco [21]. Quanto maior a função de trabalho, maior a temperatura necessária para que o cátodo passe a condição de emissor. No estado puro, metais como alumínio e ferro exigem temperaturas de operação elevadas para se tornarem bons emissores. Contudo, como possuem temperatura de vaporização relativamente baixa, estes elementos atingem o estado de vaporização antes de alcançar a temperatura exigida para que a emissão de elétrons permita manter o arco voltaico.

Nestas condições, o suprimento de elétrons passa a provir de estruturas formadas a partir de filmes óxidos depositados sobre a superfície do cátodo. Ao serem submetidos a condições de temperatura e pressão elevadas, os óxidos sofrem um processo de dissociação e liberação de oxigênio. A reação resulta na formação de uma microestrutura com função de trabalho inferior a do metal puro, permitindo a emissão de elétrons, em quantidade suficiente para manter o arco, a uma temperatura inferior a de vaporização do metal [21,23].

Apesar de possuir uma função de trabalho superior a do alumínio ou ferro, o metal tungstênio possui maior capacidade de emissão de elétrons termiônicos. Devido a sua alta temperatura de vaporização, este metal pode atingir a temperatura requerida para que a emissão de elétrons permita manter o arco sem que ocorra sua dissipação na forma de vapor metálico. Esta propriedade de emissão a temperaturas elevadas permite classificar o metal tungstênio, bem como carbono, como cátodo refratário ou quente. Materiais que necessitam da presença de óxidos para emissão de elétrons são classificados como não-refratários ou frios [16,21].

Em cátodos não refratários, independente da polaridade, a presença de filmes óxidos depositados sobre sua superfície facilita a manutenção do fluxo de corrente ao longo da coluna do arco. Como as partículas óxidas exigem menor energia para liberação de elétrons [24], as descargas elétricas se estabelecem a partir destas microestruturas. A concentração de corrente pelas partículas óxidas conduz estes emissores ao aquecimento devido a sua própria resistência elétrica e, como decorrência da redução na função de trabalho, há um aumento na produção de elétrons [20,22]. Com o acúmulo de calor, o óxido é aquecido além de sua temperatura de decomposição, sendo eliminado. Ao ser extinta a partícula óxida, ocorre o aparecimento de nova descarga elétrica localizada sobre um novo ponto catódico [25]. O constante aparecimento de novos pontos leva o arco voltaico gerado em cátodos não-refratários a apresentar uma movimentação característica. Em cátodos refratários, onde a emissão eletrônica ocorre de forma distribuída, o arco voltaico apresenta menor mobilidade, resultando em maior estabilidade espacial. A natureza do metal que compõe o cátodo exerce influência direta sobre a estabilidade espacial do arco voltaico [16].

Em cátodos a base de alumínio, o fenômeno de eliminação de óxidos é comumente denominado "efeito de limpeza". Sua atuação assume importância em função do óxido de alumínio possuir uma temperatura de fusão extremamente elevada. Caso não existisse este "efeito de limpeza", a soldagem do alumínio estaria impossibilitada, pois a película óxida forma uma camada refratária que impede a fusão do alumínio metálico.

Em atmosfera composta por gás inerte onde for excessiva a quantidade de óxidos depositados sobre a superfície catódica, a emissão se concentra junto as bordas da poça de fusão onde existe

uma maior concentração de partículas óxidas [18,21]. Em situações desta natureza, usualmente a quantidade de óxidos presentes permite a manutenção da corrente por predominância de eletrons até um valor crítico, da ordem de 75 mA/mm^2 segundo Lesnewich [21]. Acima deste valor, desencadeiam-se reações que levam a um aumento na produção de cátions (íons positivos), que se chocam contra o cátodo de forma localizada sobre os pontos catódicos, levando as regiões ao longo das bordas da poça de fusão a apresentarem um aspecto semelhante ao produzido por ataque químico (" sputtering effect "). A adição de pequenas proporções de O_2 ou CO_2 à atmosfera promove a formação de uma película óxida mais uniforme. Este procedimento permite minimizar o " sputtering effect " e estabilizar o arco, resultando em um cordão mais uniforme [21]. Com o processo MIG/MAG operando em polaridade direta (eletrodo negativo), não existem condições para que o fluxo de corrente se mantenha por predominância do fluxo de elétrons. A baixa emissão se dá em virtude da maior função de trabalho do cátodo, originada pela quase total inexistência de óxidos no arame, acrescido do fato da área passível de emissão ser limitada. Acredita-se que nesta situação os cátions passem a desempenhar maior importância na manutenção da corrente ao longo da coluna do arco [20]. Apesar de auxiliarem na manutenção do arco, a presença de cátions em proporções elevadas torna-se deletéria ao processo de soldagem, pois a interface catódica passa a apresentar grande mobilidade, o que altera constantemente o equilíbrio de forças atuantes sobre a gota metálica. Como resultado desta mobilidade da interface, o arco assume um aspecto disforme, resultando em cordões com maior largura e menor penetração. Em polaridade direta, o processo de transferência assume uma condição instável, levando a gota

metálica à um comportamento semelhante ao encontrado em transferência protegida por atmosfera de CO_2 [21].

2.1.3 Região Anódica

Das três regiões que compõem o arco voltaico, a região anódica corresponde àquela onde se verificou o menor avanço em termos de conhecimento. Até onde se observou, sob vários aspectos a região anódica é similar a região catódica, caracterizando-se por uma elevada queda de potencial em um pequeno espaço físico. Como citado anteriormente, admite-se que outra função da região anódica seja a de suprir o arco com íons positivos, auxiliando com isto na manutenção da corrente de plasma em cátodos não refratários onde não se encontrem presentes óxidos para suprir o plasma com elétrons na quantidade necessária [16,27]. Deve-se atentar ao fato desta afirmativa ainda constituir-se em hipótese, uma vez que a existência de arcos em situações como a descrita acima implica na necessidade mecanismos para a manutenção da corrente.

Uma vez que não irá aprofundar-se mais no estudo dos mecanismos envolvendo a produção e interação entre íons e elétrons nas regiões catódica e anódica, cita-se, apenas como registro, os trabalhos de Edels [16] e Guile [15] como referências bibliográficas importantes para aprofundamentos sobre as regiões do arco voltaico. A contribuição apresentada por Edels, apesar de publicada em 1961, permite uma revisão geral da física do arco, em especial no que se refere a sua análise matemática. Guile apresenta uma revisão sobre cátodos não refratários compreendendo o período entre 1970 e 1984, abrangendo de forma ampla este assunto.

2.2 INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO DA ATMOSFERA PROTETORA NA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DO ARCO VOLTAICO

A análise da distribuição espacial do arco voltaico é de grande valia para a compreensão dos mecanismos de transferência metálica e de formação do cordão de solda. A composição da atmosfera protetora, bem como os valores instantâneos assumidos pelas variáveis corrente e tensão de soldagem, definem a distribuição espacial do arco, tanto na direção radial quanto na direção axial [19].

A utilização de CO_2 como gás de proteção confere ao arco voltaico uma distribuição espacial distinta da obtida sob proteção de atmosfera inerte. Como o gás CO_2 possui uma condutividade térmica relativamente alta (2 W/M.K - watt/metro.kelvin) [26], o arco voltaico perde muito calor para o meio ambiente. As regiões periféricas da zona do arco elétrico passam a apresentar menor temperatura, deixando de atuar como condutores. Como resultado, a interface entre o arco e o ânodo sofre uma diminuição em tamanho, concentrando-se sob a extremidade inferior da gota metálica [28,29,30] (fig. 2.4-a). A constricção da interface provoca um aumento na densidade de corrente e temperatura neste local, resultando em gotas metálicas de maior temperatura [19]. Apesar da literatura técnica considerar, em sua maioria, o efeito de constricção como decorrência da elevada condutividade térmica do CO_2 , a presença de oxigênio na atmosfera do arco pode se constituir em um mecanismo adicional à redução da interface arco-ânodo. Durante a fase de crescimento da gota, ocorre difusão de oxigênio atômico da atmosfera para o interior do metal fundido. A taxa de difusão do oxigênio atômico para o ânodo é regulada pela corrente que circula pela região [32]. A presença de oxigênio no

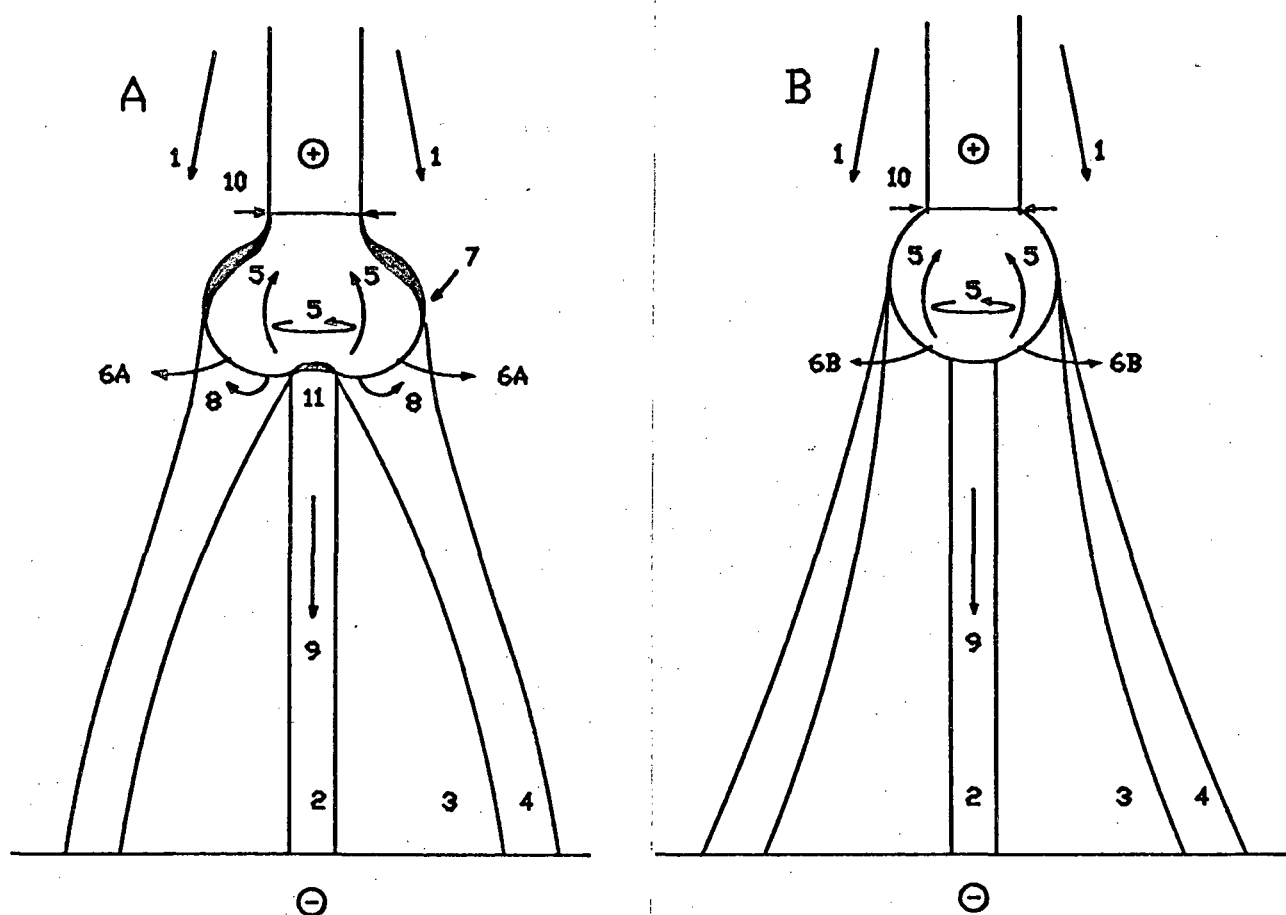


Figura 2.4 - Distribuição espacial do arco voltaico MIG/MAG protegido por (a) CO_2 e (b) argônio [19,31]:

1 - fluxo de gás de proteção; 2 - coluna do arco; 3 - arco elétrico; 4 - chama do arco; 5 - movimentação de metal líquido; 6 - vaporização de : 6A) filmes óxidos; 6B) metal líquido; 7 - produtos resultantes da redução de óxidos (SiO_2 , MnO , FeO); 8 - fluxo de fumes (CO_2); 9 - campo elétrico; 10 - linha de fusão; 11 - filmes óxidos.

metal fundido desencadeia reações de formação de óxidos, em especial, de ferro, silício e manganês [22]. A existência de um movimento de circulação de metal fundido no interior da gota [33] faz com que os óxidos sejam levados à superfície da extremidade do eletrodo [31]. Estes compostos surgem no centro inferior da gota, passando a se expandir em direção ascendente pelas bordas. Quando a temperatura da interface atinge níveis suficientemente elevados,

inicia-se uma reação de dissociação, convertendo os óxidos em sub-óxidos (FeO , MnO , SiO [22,31]). Destes três sub-óxidos, SiO adquire maior importância em razão de possuir uma taxa de formação crescente com a corrente. A presença destes sub-óxidos sobre a superfície da gota cria uma região preferencial de passagem de corrente em função da concentração de partículas de carga positiva [31].

No que se refere ao cátodo, a presença de CO_2 ou O_2 na atmosfera conduz à formação de uma película de óxidos sobre a superfície da poça de fusão, facilitando a emissão de elétrons. Com o aparecimento desta película, os pontos catódicos se concentram sobre o metal fundido, e a interface do arco imediatamente acima deste ponto sofre uma redução em tamanho [22]. Em consequência, o gradiente de potencial no arco voltaico aumenta [29,34]. Traçando um paralelo com atmosfera de argônio, a utilização de CO_2 permite produzir uma poça de fusão com maior temperatura e molhabilidade, resultando em um cordão com maior temperatura e penetração.

Em atmosfera composta exclusivamente por argônio ou por mistura deste com CO_2 (% > 20) ou O_2 (% > 5); o arco voltaico assume uma distribuição espacial diferente (fig.2.4-b). No estado puro, o gás argônio possui uma condutividade térmica relativamente baixa (aproximadamente 0.1 W/M.K) e insensível com a temperatura [28]. Protegido por esta atmosfera, o tamanho da interface entre o arco e o eletrodo acompanha o crescimento da corrente de soldagem. A medida que a corrente aumenta, a interface passa a abranger todo o hemisfério inferior da gota, até que, para correntes superiores a 200 A, atinge parte da extensão do eletrodo (fig. 2.5). Embora a adição de CO_2 ao argônio promova um aumento na condutividade térmica da mistura [35], a presença deste gás em

pequenas proporções melhora as características da transferência sem alterar o comportamento de formação do arco voltaico.

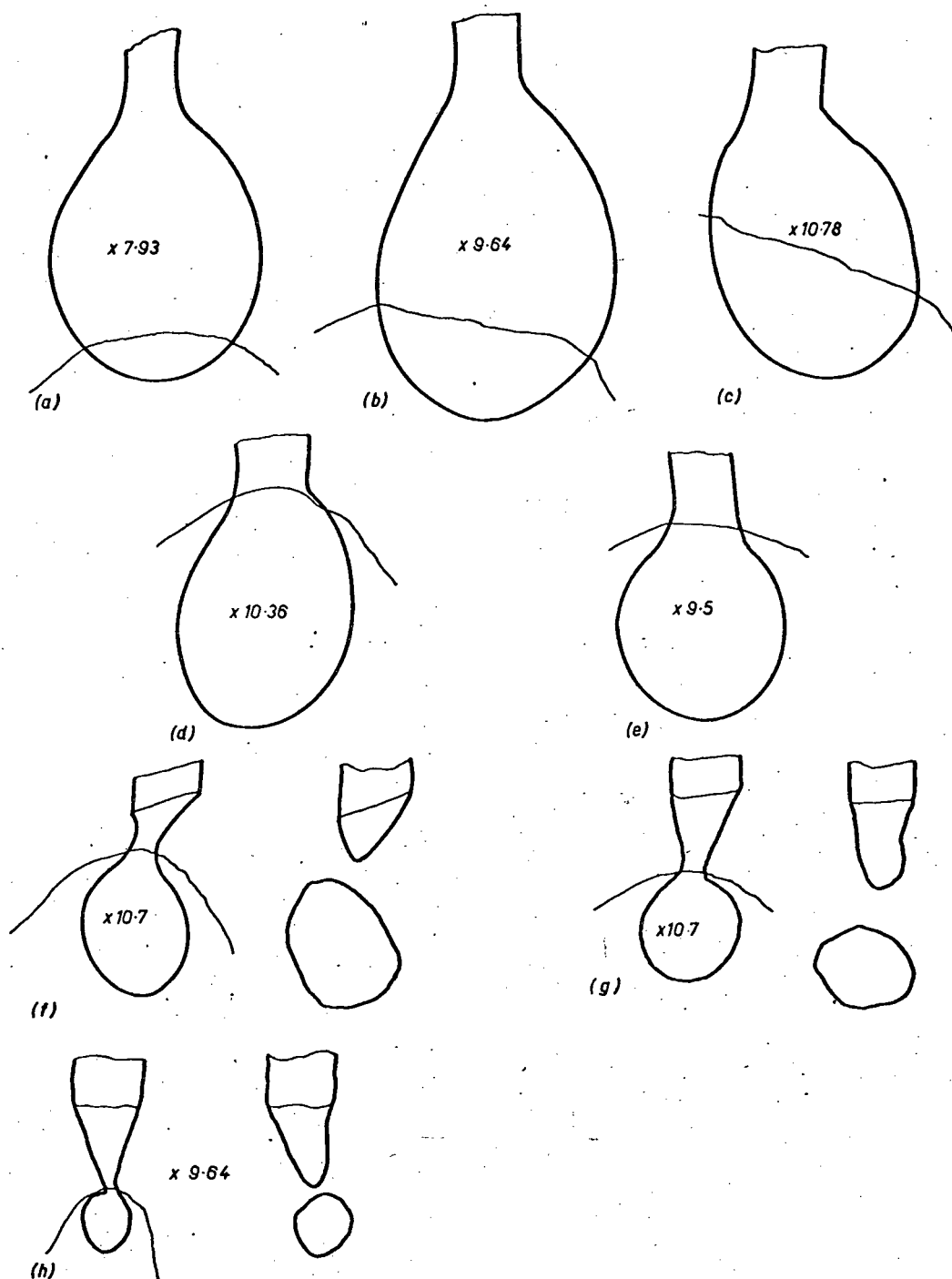


Figura 2.5 - Influência da corrente na formação da interface arco-ânodo (atmosfera: argônio; eletrodo: 1.2 mm) [36]:
a) 60 A; b) 100 A; c) 120 A; d) 140 A; e) 160 A;
f) 190 A; g) 200 A; h) 220 A.

2.3 MECANISMOS RESPONSÁVEIS PELA TRANSFERÊNCIA

A transferência metálica no processo MIG/MAG surge a partir da ação de um conjunto de forças sobre a extremidade fundida do eletrodo. As principais forças envolvidas no processo compõem-se por:

- força gravitacional;
- força gerada pela tensão superficial;
- força de origem eletro-magnética.

O mecanismo se desenvolve através de uma interação complexa entre estas forças, sob influência direta da composição química do eletrodo, das variáveis elétricas de soldagem e da natureza do gás de proteção.

A força gerada pela tensão superficial atua no sentido de se opor à separação, retendo a gota fundida ao eletrodo. Sua principal dependência é do coeficiente de tensão superficial do metal que compõe o eletrodo. A intensidade desta força reduz com o aumento da corrente em razão de uma diminuição no coeficiente de tensão superficial, redução esta provocada por um aumento na temperatura do ânodo [2], que em eletrodos consumíveis se constitui no metal de adição.

Em soldagem plana, a força gravitacional atua sempre no sentido positivo, favorecendo a separação. No sentido de correntes crescentes, esta força passa a ser menos significativa em virtude da massa da gota metálica decrescer em módulo, redução esta originada, principalmente, por uma diminuição do coeficiente de tensão superficial do metal fundido [2].

Das forças atuantes no mecanismo de separação, deve ser dado destaque às forças de origem eletromagnética pela influência que

exercem sobre o processo de transferência metálica. Esta força se origina a partir da variação da densidade da corrente, atuando tanto na gota metálica quanto na coluna do arco [37,38,39,40,41]. No ânodo, como geralmente o diâmetro da interface anódica não é igual ao diâmetro do eletrodo, a área correspondente a passagem da corrente no interior da gota sofre uma variação em tamanho (fig. 2.6). A existência desta variação na densidade de corrente leva ao surgimento de uma força cuja magnitude depende tanto da intensidade de corrente quanto do tamanho da interface anódica. A ação da força eletromagnética na extremidade do eletrodo pode ser decomposta em duas direções distintas.

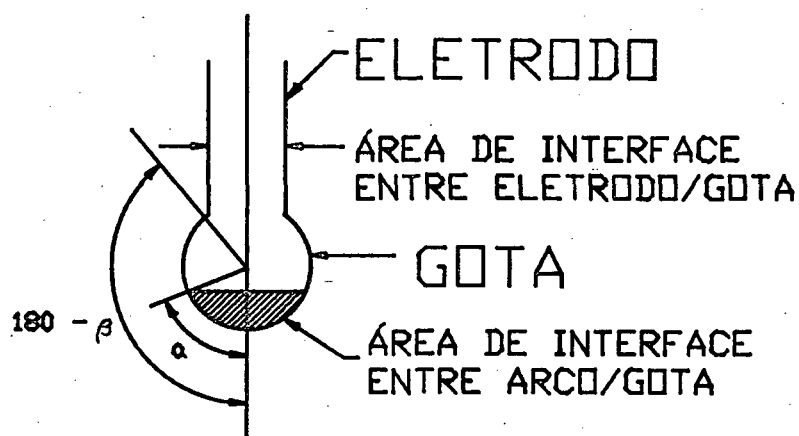


Figura 2.6 - Variação na área de passagem da corrente no interior da gota [39].

No sentido axial, a força pode tornar-se favorável ou contrária a separação, dependendo unicamente do tamanho da interface. Para uma melhor compreensão do fenômeno, toma-se por base uma modelagem matemática em que se considera a gota com uma geometria esférica. Para esta formulação, a expressão para a componente axial da força eletromagnética pode ser expressa por [38]:

$$F_z = \frac{\mu_o I^2}{4\pi} \chi(\alpha, \beta) \quad (2)$$

onde:

$$\begin{aligned} \chi(\alpha, \beta) = \ln \left[\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \right] - \frac{1}{4} + \frac{1}{1 - \cos \alpha} + \\ + \left[\frac{2}{(1 - \cos \alpha)^2} \ln \left[\frac{2}{1 + \cos \alpha} \right] \right] \end{aligned} \quad (3)$$

com μ_o sendo a permeabilidade do vácuo e os ângulos α e β sendo apresentados na figura 2.6. Nesta expressão deve-se observar dois aspectos importantes. O primeiro se refere a dependência quadrática entre F_z e a corrente. O segundo aspecto se refere ao fator $\chi(\alpha, \beta)$ que, além de alterar a intensidade, define o sentido de atuação da força. Caso o ângulo α seja pequeno, o fator $\chi(\alpha, \beta)$ assume valores negativos e F_z passa a atuar contra a gota fundida. Para $\alpha = \beta$ a função $\chi(\alpha, \beta)$ torna-se zero e F_z assume o valor máximo quando $\chi = \pi/2$.

Em atmosfera de argônio, o aumento da corrente promove um aumento na área de interface entre o arco e o ânodo, conduzindo a componente vertical da força eletromagnética a uma razão de crescimento superior a sua dependência quadrática com a corrente. No sentido de correntes crescentes, F_z assume valores cada vez maiores, ao passo que as forças de tensão superficial e gravitacional reduzem sua intensidade de atuação sobre a gota fundida. Desta forma, em correntes elevadas a componente vertical da força eletromagnética assume a condição de principal agente responsável pela separação. Sob proteção de atmosfera composta por

argônio, somente para valores de corrente menores do que 100 A esta força pode assumir sentido negativo em razão da interface anódica assumir dimensões pequenas [38]. Em atmosfera de CO₂, onde o efeito de constricção reduz o tamanho da interface, o ângulo α assume valores menores do que aqueles encontrados em atmosferas de argônio.

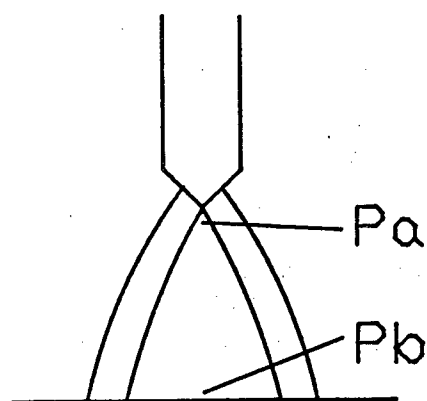
Deve-se observar que apesar da expressão (1) ser aceita como instrumento de quantificação da componente vertical da força eletromagnética, esta se constitui em uma modelagem matemática, possuindo simplificações envolvidas em sua formulação e limitações em sua aplicabilidade [38]. Outras modelagens podem ser encontradas na literatura técnica [36,37,40] que, da mesma forma que (1), apresentam simplificações e aplicação limitada. A apresentação desta expressão neste texto visa, unicamente, permitir a maior compreensão da influência que a intensidade da corrente e distribuição espacial do arco podem exercer sobre a componente axial da força eletromagnética. Estudos no sentido de encontrar um instrumento de quantificação de validade geral ainda continuam em desenvolvimento, sem que se tenha encontrado, até o momento, algo definitivo.

Na direção radial, a força eletromagnética gera uma pressão contra o eletrodo, produzindo um efeito de estrangulamento denominado de efeito Pinch. Este efeito assume grande importância em transferência por curto-circuito por ser o principal elemento responsável pela separação da gota.

O aparecimento de uma força como decorrência da variação da densidade de corrente se aplica igualmente ao arco voltaico. Como as dimensões do eletrodo criam uma limitação ao tamanho de sua interface com o arco, a interface arco-peça obra acaba por assumir dimensões maiores. Esta diferença de tamanho gera uma densidade de

corrente divergente ao longo da coluna do arco. Próximo a região do eletrodo, a componente radial da pressão eletromagnética possui maior intensidade, que reduz a medida que se aproxima da peça-obra. O efeito resultante da ação desta componente influe na distribuição espacial do arco voltaico.

No sentido axial, a diferença na densidade de corrente produz uma diferença de pressão entre o ânodo e o cátodo, gerando um fluxo de gás de plasma direcionado à poça de fusão [20,21,38]. Durante a formação da gota, a pressão junto ao ânodo cria uma força de reação contrária a separação. Propriamente, esta força de reação não depende exclusivamente da pressão junto ao ânodo, mas da diferença de pressão ao longo da coluna (fig. 2.7). Quanto maior esta diferença, menor a reação exercida contra a gota metálica durante seu crescimento. Em atmosferas de argônio, a pressão junto ao cátodo assume valores próximos ao da pressão atmosférica. Por este motivo, a diferença de pressão torna-se numericamente igual a pressão anódica, levando a força de reação ao crescimento da gota a assumir valores desprezíveis. Em correntes elevadas o jato de plasma assume proporções significativas, promovendo um mecanismo adicional de aceleração da gota [20].



A-pressão junto ao ânodo
B-pressão junto ao cátodo

$$\Delta p = P_A - P_B$$

Figura 2.7 - Variação da pressão ao longo da coluna do arco [22].

Em atmosfera de CO_2 o sistema de forças atuantes apresenta um nível maior de complexidade. A presença de monóxido de carbono e oxigênio ativo dão origem a forças de contra-separação que superam as forças favoráveis à transferência. Dependendo da combinação entre tensão e corrente de soldagem, a gota metálica, ainda presa à extremidade do arame, é levada a oscilar em torno do eixo do eletrodo (fig. 2.8). Quando finalmente se processa a separação, a gota possui tamanho excessivamente grande e, em razão do movimento de rotação, acaba assumindo trajetória para fora da poça de fusão. Este tipo de transferência caracteriza a

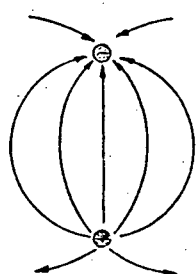


Figura 2.8 - Deslocamento característico da gota em transferência repulsiva.

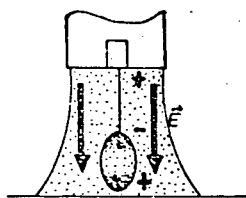
transferência repulsiva. Vários mecanismos tem sido propostos para explicar a origem das forças que promovem o aparecimento deste tipo de transferência:

- Aumento da força dirigida contra a extremidade inferior do eletrodo, provocada pela diminuição da diferença de pressão ao longo da coluna do plasma [22]. A origem deste efeito surgiria em função de uma redução no tamanho das interfaces, aumentando a pressão local e diminuindo, com isto, a diferença de pressão ao longo da coluna do arco;

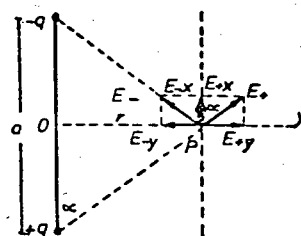
- Surgimento de uma força repulsiva originada pela presença de monóxido de carbono na atmosfera da coluna do arco [19]. Este efeito se torna possível devido a distribuição eletrônica da molécula CO, que caracteriza um dipolo elétrico (fig.9-a). Na presença de um campo elétrico, a molécula tende a se orientar segundo a direção do campo (fig. 2.9-b), gerando uma força eletromagnética dirigida contra a gota metálica (fig. 2.9-c). Esta força, ou momento torsor do dipolo [42], surge da interação entre o campo elétrico gerado pelas cargas que compõem o dipolo e o campo elétrico do arco voltaico. Apesar das moléculas de CO estarem presentes em todas as posições da coluna do arco, somente aquelas moléculas que estariam próximas ao ânodo teriam atuação decisiva na geração desta força. Segundo Smith [43], a força repulsiva provocada pelo momento torsor do dipolo CO seria preponderante até cerca de 200 A;



A



B



C

Figura 2.9 - Comportamento da molécula de CO na atmosfera do arco voltaico: a) representação do dipolo elétrico; b) orientação da molécula segundo a direção do campo; c) força eletromagnética resultante dirigida contra a gota metálica [19].

- Redução na intensidade da componente vertical da força eletromagnética provocada pela diminuição do tamanho da interface anódica [41]. Segundo este ponto de vista, a componente vertical da força eletromagnética manteria um sentido favorável ao destacamento, deixando, contudo, de exercer uma supremacia sobre o mecanismo de separação. Deve-se observar que esta hipótese, a qual acredita-se ser a mais correta, implica, obrigatoriamente, na existência de outras forças, que seriam as responsáveis pelo efeito de rotação da gota. Ainda no que se refere a componente vertical da força eletromagnética, cogita-se a possibilidade desta atuar no sentido contrário a separação [28,39]. Por esta teoria, a inversão no sentido de atuação da força se dá em função da densidade de corrente no interior da gota assumir uma distribuição convergente. Utilizando a expressão (1) apenas como instrumento de demonstração, esta inversão no sentido de atuação se daria em função de κ (α, β) assumir valores negativos ($\alpha < \beta$). Segundo Carter [30], com o crescimento da gota esta componente força vertical empurraria o metal fundido para um lado, provocando uma distorção no caminho da corrente (fig. 2.10) e com isto incrementando a força contrária a separação por gerar um efeito de sopro-magnético;

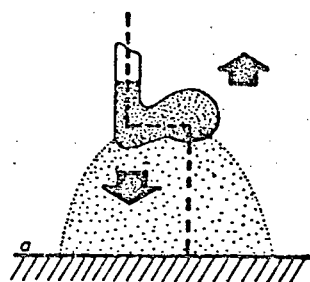


Figura 2.10 - Distorção caminho da corrente provocado pelo aparecimento de uma força contrária à separação [19].

- Incremento acentuado de choque de vapores metálicos contra a superfície inferior da gota [22]. O incremento da produção de vapores metálicos se dá em função da presença, em quantidade elevada, de oxigênio ativo na atmosfera do arco;

Na figura 2.11 é apresentado um esquema representativo das forças atuantes no mecanismo de separação em atmosfera de CO_2 (fig 2.11-a) e argônio (fig 2.11-b).

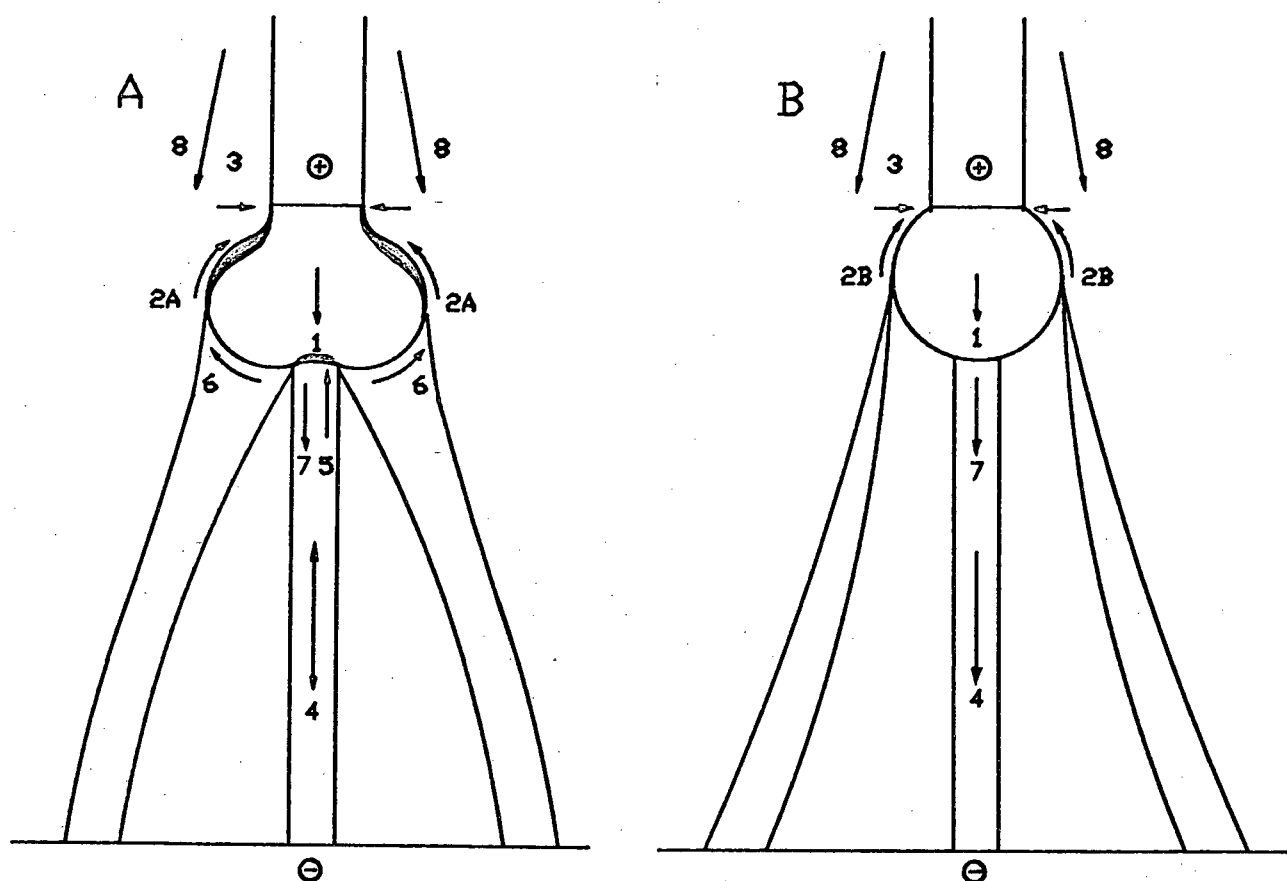


Figura 2.11 - Equilíbrio de forças atuantes sobre a gota metálica em atmosfera de a) CO_2 e b) argônio [19,22,38]:

1 - força da gravidade; 2 - tensão superficial: a) do filme de óxidos e do metal líquido e b) do metal líquido; 3 - componente radial da força eletromagnética (efeito " Pinch "); 4 - pressão eletromagnética da coluna dinâmica do plasma; 5 - força devido ao momento torsos do dipolo CO; 6 - força devido a vaporização de filmes óxidos; 7 - componente axial da força eletromagnética; 8 - força de arrasto gerada pelo escoamento do gás de proteção.

2.4 MODOS DE TRANSFERÊNCIA

Uma vez que são conhecidas as forças responsáveis pelo mecanismo de separação, pode-se comentar sua influência sobre o modo adquirido pela transferência metálica. Na Tabela 2.1 apresenta-se a classificação desenvolvida pelo IIW para caracterizar os diferentes modos de transferência no processo MIG/MAG. A fig. 2.12 apresenta a representação dos modos de transferência contidos na Tabela 2.1.

1 - TRANSFERÊNCIA EM VÔO LIVRE

2 - TRANSFERÊNCIA COM CONTATO ENTRE OS ELETRODOS

1.1 - GLOGULAR

GOTEJAMENTO (A)

REPULSIVA (B)

CURTO-CIRCUITO (F)

1.2 - SPRAY

PROJÉTIL (C)

PULVERIZAÇÃO AXIAL (D)

ROTATIVA (E)

TABELA 2.1 - Classificação do IIW para os modos de transferência metálica aplicáveis ao processo de soldagem MIG/MAG [36].

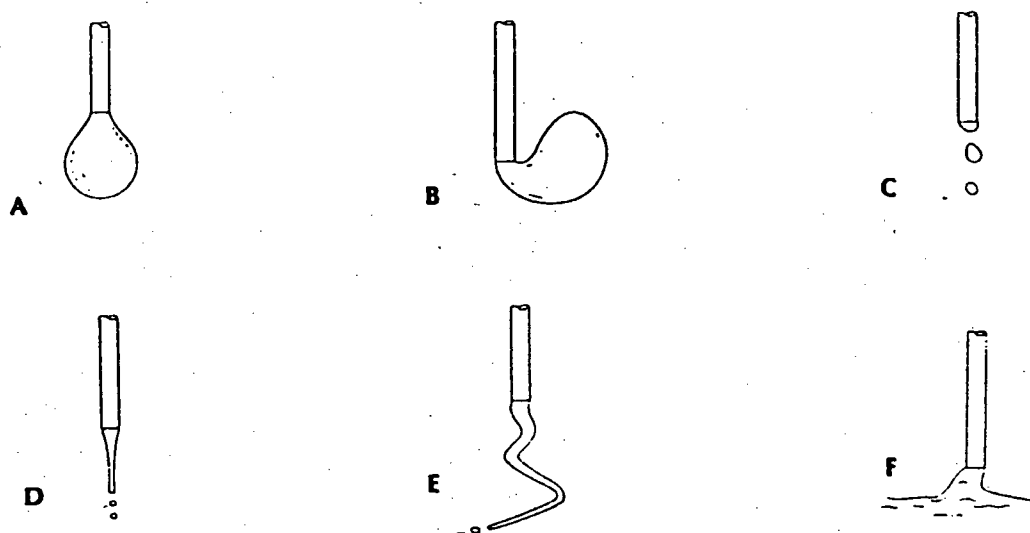


Figura 2.12 - Representação dos modos de transferência metálica no processo de soldagem MIG/MAG [14].

Em correntes muito baixas e valores de tensão suficientemente altos para evitar transferência por curto-circuito, as forças dominantes são a gravitacional e tensão superficial. Esta combinação resulta em transferência globular (fig. 2.12-a). Durante seu crescimento, a gota sofre ação positiva da força de gravidade (soldagem plana) e uma força de retenção proveniente exclusivamente da tensão superficial. A separação efetiva ocorre quando a força peso sobrepõe a de tensão superficial. Mesmo em transferência com argônio, este modo de transferência é quase sempre instável e limitado a posição plana [24]. Aumentando o valor de corrente de soldagem, a força eletromagnética assume a mesma ordem de grandeza ou torna-se superior a força da gravidade. Em atmosfera composta por argônio, o aumento da corrente promove um aumento no tamanho da interface anódica, que passa a abranger o hemisfério inferior da gota. A corrente assume uma distribuição divergente conduzindo a componente vertical da força eletromagnética a um sentido positivo. O aumento da corrente reduz a força de tensão superficial em razão do aumento da temperatura da gota. Esta combinação de forças resulta em uma transferência por projétil (fig. 2.12-b). Neste modo de transferência, as gotas adquirem diâmetro próximo ao do eletrodo e são dirigidas contra a poça com uma aceleração superior a da gravidade. Acima de 200 A (eletrodo de 1.2 mm / Ar) a interface entre o ânodo e o arco deixa de se formar sob a extremidade inferior do eletrodo e alcança regiões acima da gota (fig. 2.12-d). A força eletromagnética atinge magnitude muito superior as demais forças, passando a condição de supremacia absoluta. A transferência se caracteriza pela redução acentuada no diâmetro e aumento da frequência de transferência das gotas. A pressão sobre o ânodo, gerada pela força eletromagnética, atinge valores muito elevados, levando a

extremidade do eletrodo a assumir uma geometria cônica. O jato de plasma assume proporções elevadas incrementando acentuadamente a aceleração das gotas em direção à poça de fusão. Em atmosfera de CO_2 a constrictão do arco, em conjunto com a natureza oxidante da atmosfera, dá origem a forças de contra-replusão que conduzem ao aparecimento da transferência repulsiva (fig. 2.12-^B~~A~~).

Quando a tensão e corrente de soldagem possuem valores muito baixos, a transferência ocorre por curto circuitos (fig. 2.12-^F~~B~~). Para demonstrar como se processa este tipo de transferência metálica, apresenta-se na figura 2.13 um esquema representativo do processo de formação e separação da gota metálica. Logo após a separação (fig. 2.13-a) inicia-se a fase de arco, momento em que a extremidade do eletrodo se encontra mais afastada em relação a poça de fusão. Uma vez que existe espaço livre, o material decorrente da fusão do eletrodo inicia o processo de formação da

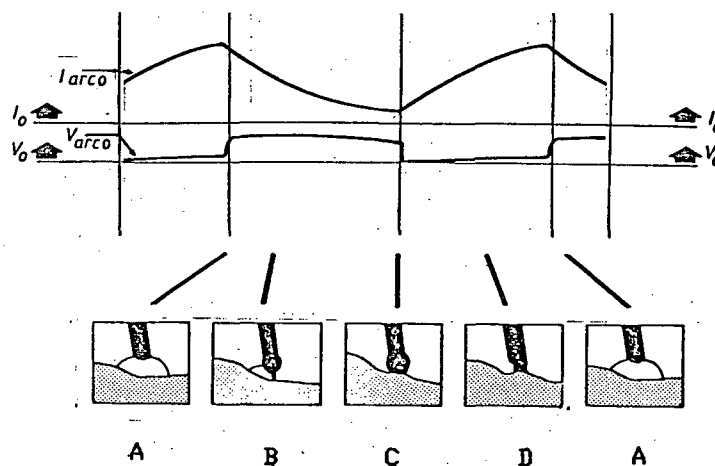


Figura 2.13 - Sequência de separação em transferência por curto-circuito [14].

gota metálica (fig. 2.13-b), mantendo seu crescimento até o instante do contato físico com a poça de fusão (fig. 2.13-c). Em função deste contato, a corrente elétrica que percorre o circuito cresce em magnitude, fazendo com que as forças de origem

eletromagnética aumentem a intensidade da pressão sobre o eletrodo sólido e a massa fundida (fig. 2.13-d). Como consequência deste aumento da pressão inicia-se um processo de constrictão da ponte de ligação seguido de seu rompimento e culminando com a transferência da gota à poça de fusão. Havendo o rompimento da ponte, ocorre a reignição do arco e o reinício do ciclo. Ao longo de todo o processo o afastamento entre a linha de fusão e a superfície da poça metálica mantém-se praticamente inalterada [45]

2.5 REGULARIDADE DA TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR CURTO-CIRCUITO

A existência de curto-circuitos está condicionada a um desequilíbrio entre a velocidade com que o eletrodo é introduzido no arco e a taxa de transferência das gotas à poça de fusão. Durante a fase arco, a corrente elétrica que percorre o circuito não permite que a força eletromagnética atinja magnitude suficiente para promover o desprendimento da gota antes que ocorra o contato com a poça de fusão. A separação efetiva só se dá durante o curto-circuito em função dos níveis de corrente atingidos durante esta fase serem elevados.

Para a análise da regularidade, um fator importante é a magnitude que a pressão eletromagnética assume durante a fase de curto-circuito [46]. Sob o aspecto da separação propriamente dita, é desejável que a intensidade da pressão eletromagnética seja suficientemente elevada para propiciar o rompimento da ponte e transferência da gota de forma eficiente. Porém, caso a corrente durante esta fase assuma valores de pico muito elevados, a pressão eletromagnética atuará de forma muito energética sobre a ponte de ligação, promovendo a formação de salpicos. Picos de corrente

elevados acabam por gerar no instante da reignição potência suficiente para ejetar metal fundido para fora da região do arco, seja na forma de pequenas quantidades de metal fundido remanecente da extremidade sólida do eletrodo (salpico fino) ou na forma de gotas. Em qualquer uma destas situações caracterizam-se irregularidades na transferência. A ocorrência deste fenômeno é extremamente prejudicial não só a regularidade, mas também a produtividade do processo de soldagem, uma vez que se torna necessário o dispêndio de tempo para a limpeza do bocal e da superfície da peça soldada.

Em função da dependência entre a pressão eletromagnética e a intensidade da corrente, torna-se necessário comentar a influência que a fonte de energia desempenha no processo de transferência. Apesar de muitas vezes não serem consideradas, as características estática e dinâmica da fonte influem de forma direta no comportamento assumido pela corrente durante o tempo de curto [46,47].

Em sua maioria, as fontes convencionais ou transistorizadas que operam em tensão constante não possuem condições de ajuste de corrente de forma a evitar a produção de salpicos. A inexistência de controle sobre a corrente no momento da separação da gota pode resultar em níveis de potência excessivamente elevados no instante do reacendimento do arco. A menos que seja feito um controle sobre a corrente nos instantes que antecedem a reignição [48,49] não existe forma de eliminar a produção de salpicos. Atuar sobre a indutância elétrica do circuito, forma mais usual de minimizar esta produção, pode gerar distúrbios no processo de transferência em função da corrente, na fase de arco, decair de forma muito lenta [47]. Nestas condições, a pressão do arco voltaico sobre a poça de fusão gera perturbações na superfície do metal fundido.

Como decorrência, surgem pequenos contatos entre o arame e peça-obra sem que haja a transferência da gota. Estes contatos são extremamente prejudiciais a regularidade. O aparecimento de contatos ineficientes permite a gota continuar seu processo de crescimento até o instante da separação efetiva. Ao transferir-se, o tempo de curto aumenta, a corrente assume proporções elevadas e a reignição é acompanhada da produção de salpicos. Caso a resposta dinâmica da fonte seja muito rápida, ao menor contato eletrodo-peça [47] a corrente poderá assumir proporções suficientes para promover a separação mesmo que a gota não tenha atingido tamanho suficiente para coalescer na poça de fusão, o que fará que esta seja ejetada para fora da região do arco [50,51]. Atuar somente sobre a indutância não permite obter a condição de maior regularidade de transferência. No cap. 5 este assunto será tratado em maiores detalhes.

Além das características estática e dinâmica da fonte, a composição da mistura gasosa escolhida para compor a atmosfera protetora é outro fator que pode influir diretamente sobre a operação de soldagem. Como exemplo, uma vez que tenha sido imposto ao processo a utilização de CO_2 como atmosfera de proteção, introduz-se um limitante ao nível de regularidade obtenível da operação de soldagem.

2.6 RADIAÇÃO LUMINOSA EMITIDA PELO ARCO VOLTAICO

A distribuição da radiação emitida pelo plasma compõe-se por luz policromática de fundo contínuo, sobre a qual se sobrepõem diferentes linhas espectrais. O aparecimento destas linhas, assim como a intensidade luminosa emitida pelo plasma, dependem

fundamentalmente da composição da atmosfera protetora (fig. 2.14), do material que compõe os eletrodos (fig. 2.15) e temperatura do plasma [52,53]. A emissão de luz no espectro visível provém tanto do metal fundido e incandescente, quanto da emissão dos fótons oriundos da ionização do gás. A natureza química dos metais que compõem os eletrodos assume importância nos comprimentos de onda longos ($500 < \lambda < 760$ nm) onde a resposta visível é maior. A radiação dos gases que compõem o plasma é predominante na emissão ultravioleta e predominante na região do espectro entre 400 e 500 nm [52].

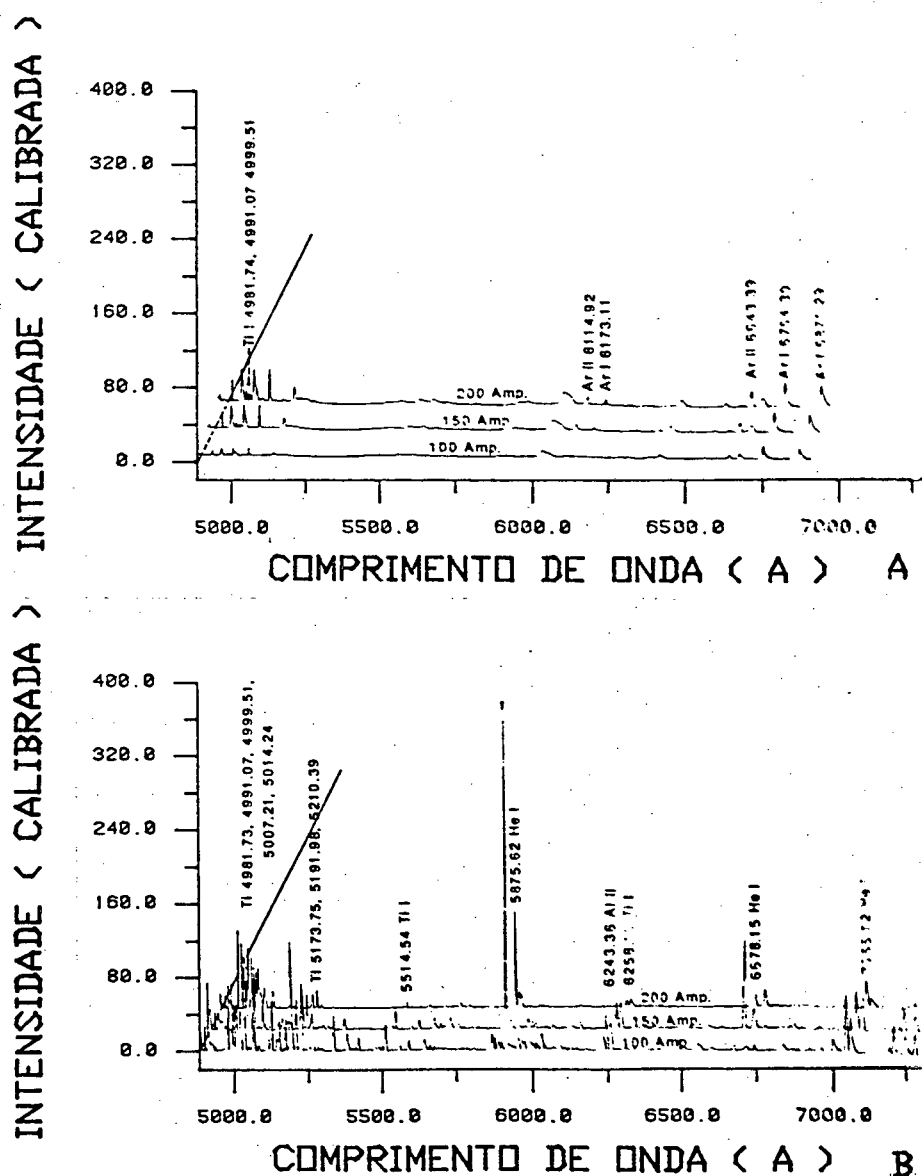


Figura 2.14 - Efeito da corrente no espectro entre 4.800 e 7.300 Å em arco de (a) argônio e (b) hélio. Metal de base: Ti-6AL-4V [53].

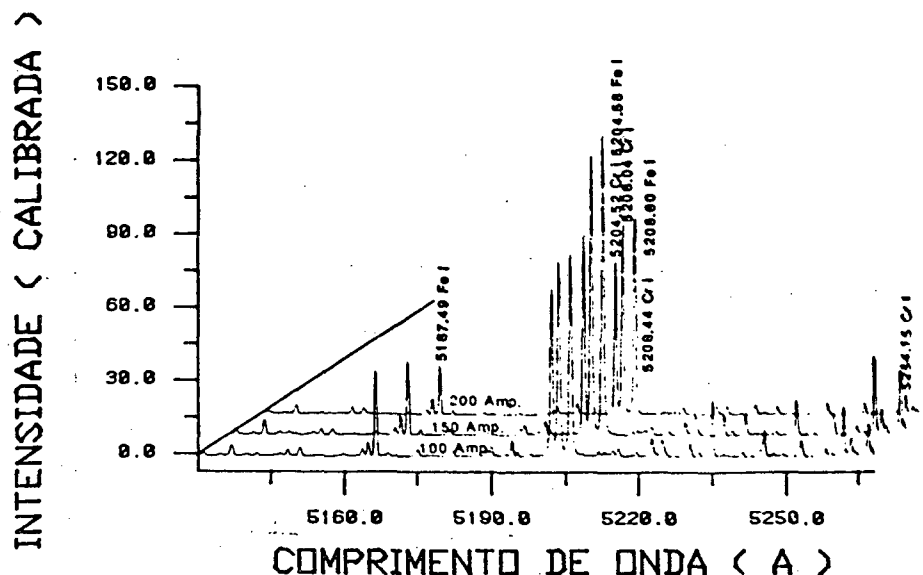


Figura 2.15 - Efeito da corrente no espectro entre 4.800 e 7.300 Å
Metal de base: Aço inox AISI 304; Gás: hélio [53].

Fixadas a composição da atmosfera protetora e os materiais que compõem os eletrodos, a luminosidade emitida pelo arco torna-se dependente da corrente de soldagem. Para transferência por curto-circuito a emissão de radiação luminosa assume condição especial. Diante das variações instantâneas da corrente de soldagem, deve-se esperar que a radiação luminosa emitida pelo plasma sofra variações não só em sua intensidade, mas também na distribuição do espectro. A magnitude da corrente, assim como a natureza do cátodo e a composição da atmosfera, exercem influência sobre a ionização do gás e a vaporização metálica e estas, de forma direta, sobre o espectro luminoso visível.

3 REGISTRO FOTOGRAFICO: SISTEMA ÓTICO

Para os processos de soldagem MIG/MAG e eletrodo revestido, a técnica básica empregada para a execução de registros fotográficos consiste em iluminar a região do arco com uma fonte de luz externa, sendo a câmera fotográfica posicionada frontalmente à fonte de luz.

Para a função de gerar luz de fundo, a solução mais comum consisti na utilização de lâmpadas de Xenônio. Como estas lâmpadas emitem luz mono-cromática de elevada potência, a realização de registros fotográficos se viabiliza pela incorporação ao sistema de filtros de elevada densidade ótica [54], permitindo uma redução na intensidade luminosa incidente na câmera (fig.3.1). Apesar da possibilidade dos bons resultados alcançáveis com estas fontes,

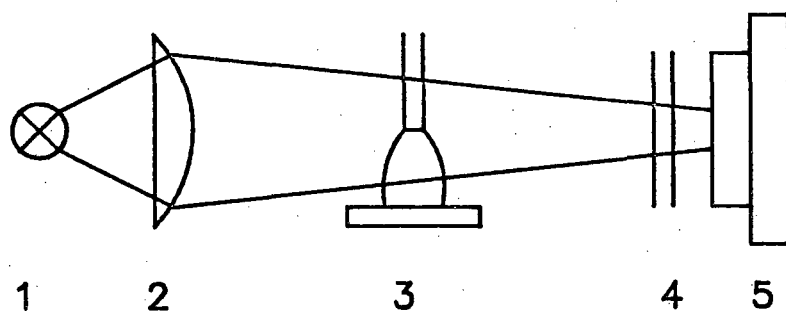


Figura 3.1 - Esquema de montagem de um sistema ótico utilizando lâmpada de Xenônio para gerar luz de fundo.

1 - lâmpada de Xenônio; 2 - lente; 3 - arco voltaico;
4 - filtros; 5 - câmera fotográfica [55]

o elevado nível de atenuação necessário pode resultar em perdas de informações sobre a distribuição espacial do arco [56]. Além deste aspecto, as lâmpadas de Xenônio não permitem períodos de ascendimento prolongados, acrescido do fato de possuírem um custo

de aquisição elevado. Com o desenvolvimento das fontes laser destinadas à aplicação ótica, estas passaram a ser utilizadas para a geração da luz de fundo. Vários fatores contribuíram para a utilização das fontes laser nos sistemas dedicados à aquisição de imagens do processo de soldagem. Os lasers de He-Ne ($\lambda = 632.8$ nm), em conjunto com filtros adequados, possibilitam a eliminação parcial da luz do arco, em função de uma diferença entre o comprimento de onda do laser e a parcela de luz mais visível do arco. Além deste aspecto, não há limitação quanto ao seu período de acendimento e possuem custo relativamente baixo.

Para o desenvolvimento do sistema, decidiu-se utilizar uma fonte laser para gerar a luminosidade de fundo em função da disponibilidade de equipamento, e dos custos envolvidos na aquisição de uma lâmpada de Xenônio, aproximadamente 15 vezes mais elevados do que os custos da fonte laser utilizada.

3.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

O esquema de montagem do sistema é apresentado na figura 3.2.

O feixe luminoso ($\lambda = 632.8$ nm), emitido pela fonte laser (1), transpõe uma lente expansora (2), sofrendo um aumento em seu diâmetro indo incidir sobre uma lente plano-convexa (3). Esta lente colima os raios expandidos, dirigindo-os para o arco voltaico (9). Ao transpô-lo, o feixe se projeta sobre a lente (4), que promove sua convergência, indo incidir sobre a objetiva da câmera e filme fotográfico (8).

A redução seletiva da luminosidade do arco, em relação a luz de fundo produzida pelo laser, é conseguida pela incorporação de um filtro espacial (4,5), permitindo que uma parcela

significativa da luz emitida pelo arco não incida sobre a película fotográfica. Como este filtro não permite variações no

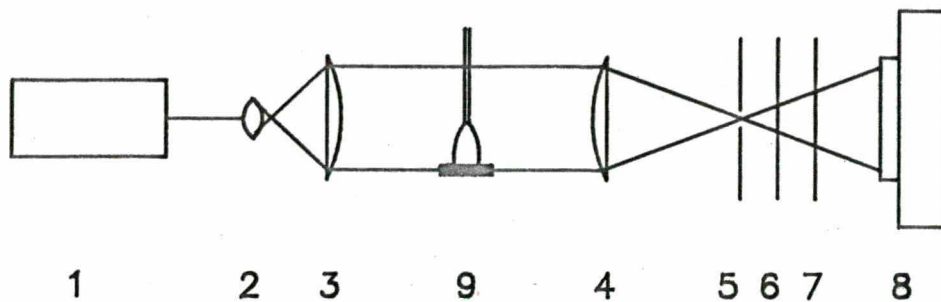


Figura 3.2 - Esquema de montagem do sistema: 1 - tubo laser; 2 - expensor; 3 - lente plano-convexa; 4 - objetiva de 6 elementos; 5 - orifício; 6, 7 - polarizadores; 8 - filme fotográfico; 9 - arco voltaico.

ajuste da quantidade de luz, foi introduzido um conjunto de polarizadores (6,7) para permitir um ajuste fino da luminosidade. Com esta configuração a montagem se torna importante no estudo da distribuição espacial do arco voltaico (fig. 3.3).

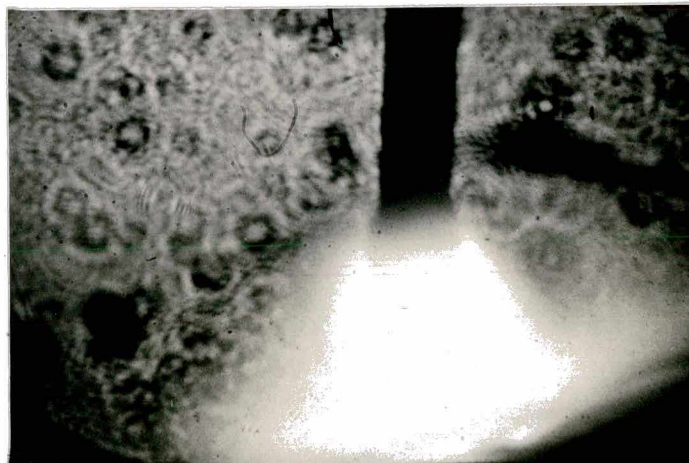


Figura 3.3 - Registro fotográfico do arco voltaico utilizando polarizadores e filtro espacial para redução da luminosidade do arco.

Nova configuração pode ser obtida com a substituição dos polarizadores por um filtro interferométrico. Esta montagem possibilita a observação e registro dos fenômenos de separação metálica sem a presença da luz do arco (fig. 3.4). A eliminação da luminosidade se torna possível pela característica de resposta do filtro utilizado, que permite somente a passagem de luz do mesmo comprimento de onda do laser .

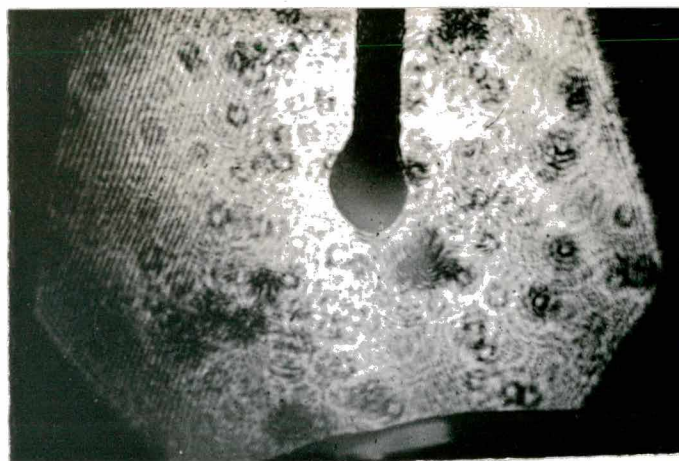


Figura 3.4 - Registro fotográfico com eliminação da luminosidade do arco pela incorporação de filtro interferométrico.

Nos itens seguintes deste capítulo, são analisados os componentes básicos que compõem o sistema.

3.2 FILTRO ESPACIAL

A presença do filtro espacial tem por objetivo reduzir a quantidade de luz proveniente do arco. O princípio de redução (fig. 3.5) se baseia na característica da luz emitida pelo arco não possuir uma direção única de propagação. Como a emissão ocorre em todas as direções, somente a parcela dos feixes com direção paralela ao eixo ótico converge no orifício e se projeta sobre a

película. A parcela dos feixes luminosos com direção não paralela ao eixo ótico, após incidir sobre a lente (4), projeta-se sobre a superfície do disco metálico que contem o orifício. Este efeito de redução é seletivo pois se aplica unicamente aos feixes luminosos emitidos pelo arco. A luz de fundo não é afetada pelo filtro espacial pois sua direção de propagação é paralela ao eixo ótico do sistema. Ao incidir sobre a lente (4) o feixe proveniente do laser sofre convergência, direcionando-se ao orifício do disco metálico.

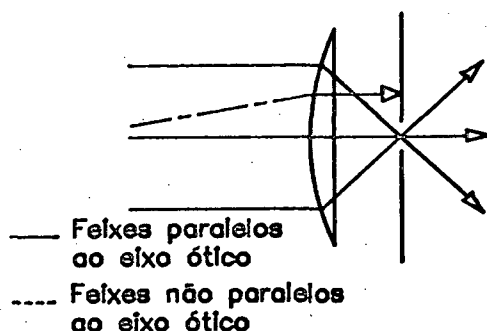


Figura 3.5 - Princípio de atenuação do filtro espacial.

A eficiência deste filtro está relacionada tanto a adequada seleção da lente, quanto ao diâmetro do orifício que limita a quantidade de passagem de luz. Seguindo o esquema apresentado na figura 3.1, utilizou-se em (4) uma objetiva fotográfica de 180 mm e em (5) um disco metálico com orifício central de 2 mm de diâmetro. O fato destas objetivas serem compostas por um conjunto de 6 a 8 elementos (lentes) permite que os efeitos de aberração da imagem [54,57] sejam minimizados. Cabe observar que escolheu-se esta objetiva por recomendação contida em [56], não estando descartada a possibilidade de utilização de lentes mais simples.

Para o registro fotográfico ou observação do arco voltaico deve-se compor o filtro espacial com orifício de diâmetro na faixa de 2 mm. Apesar de normalmente utilizado em diâmetros menores [58], observou-se que a utilização de orifícios com diâmetros inferiores a 1.5 mm resultaram em uma sensível redução na qualidade da imagem. Variações bruscas no índice de refração na região do arco fazem com que o ponto de convergência dos feixes não se mantenha continuamente sobre a mesma posição. Em virtude de uma movimentação contínua, a utilização de orifícios de menor dimensão pode originar pequenas interrupções do feixe luminoso, impossibilitando a formação integral da imagem.

Na montagem do filtro espacial dois aspectos devem ser levados em consideração. Além do posicionamento do orifício no ponto focal da lente, o afastamento da objetiva em relação ao arco voltaico deve ser equivalente a duas vezes sua distância focal (fig. 3.6). Assumiu-se esta recomendação [56] de afastamento como valor otimizado para a eficiência deste filtro.

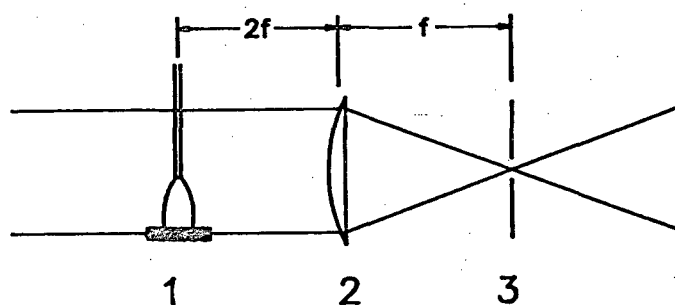


Figura 3.6 - Recomendação de montagem do filtro espacial

1 - arco voltaico; 2 - lente de 6 elementos
3 - orifício ; f - distância focal da lente

3.3 POLARIZADORES

Executam a função de ajuste fino da luminosidade incidente sobre a câmera fotográfica. Apesar do filtro espacial reduzir sensivelmente a radiação emitida pelo arco, esta ainda pode encontrar-se em nível desfavorável à realização dos registros fotográficos. A necessidade de incorporação dos polarizadores como instrumento de atenuação decorre de uma exigência operacional que impede a utilização dos recursos próprios da câmera no controle efetivo da luminosidade incidente sobre a película fotográfica. Como citado no item 3.3, o filtro espacial altera a característica física da luz incidente sobre a câmera. Este elemento permite que seja transmitida somente a parcela dos feixes luminosos com direção paralela ao eixo óptico do sistema. A presença do filtro espacial delega ao diafragma da câmera a função de delimitador do campo de imagem, uma vez que o controle da quantidade de luz incidente passa a ser exercido pelo diafragma do filtro (fig.3.7).

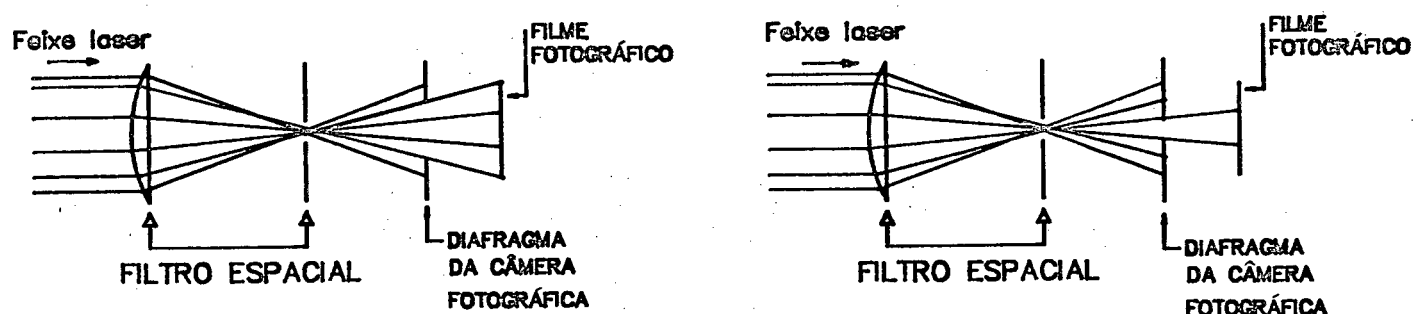


Figura 3.7 - Influência da abertura do diafragma da câmera no tamanho da imagem projetada no filme fotográfico.

Diante deste comportamento, torna-se necessário operar com o diafragma aberto para permitir a livre passagem do feixe luminoso proveniente do sistema ótico. Este procedimento garante, na película fotográfica, a presença integral da imagem do arco voltaico ou da transferência metálica. A necessidade de se ter que operar com o diafragma aberto elimina a possibilidade de se utilizar este instrumento no controle da luminosidade tendo-se, por isto, que recorrer a elementos externos para esta função.

O princípio de redução da luminosidade produzido pelos polarizadores se baseia na absorção seletiva da radiação incidente em um plano preferencial, denominado plano de polarização [54] (fig. 3.8). Ortogonal a este plano encontra-se outro onde a transmissão da radiação é quase integral. A este plano denomina-se plano de transmissão. A eficiência da transmissão só não é total em virtude de uma pequena absorção por parte do substrato que compõe o polarizador.

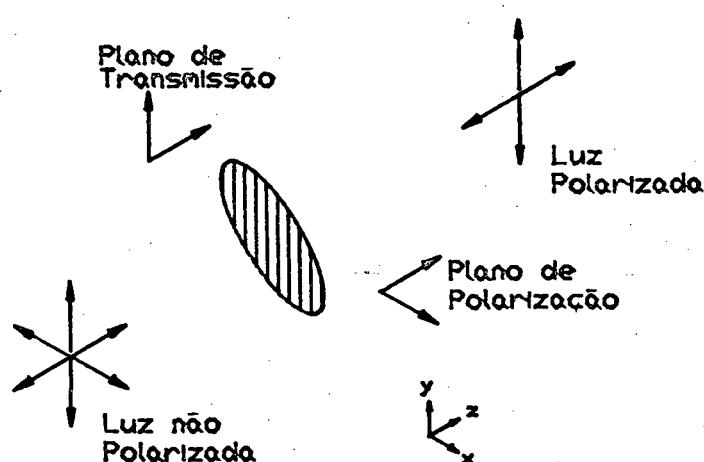


Figura 3.8 - Princípio de atenuação dos polarizadores.

Em termos operacionais, o controle efetivo da luminosidade só pode ser obtido com a utilização de um par de polarizadores. Esta

exigência surge em função da luz emitida pelo arco se caracterizar por ser uma luz não polarizada. Posicionado o primeiro polarizador, este estabelece o plano preferencial de transmissão. Atuando sobre a posição angular do segundo polarizador obtém-se o controle efetivo da luminosidade incidente sobre a película fotográfica. Planos de transmissão com defasagem de 0° (fig. 3.9) resultam em transmissão máxima (H_0), ao passo que defasagem de 90° faz com que toda a luminosidade incidente sobre os polarizadores seja absorvida. Promovendo uma defasagem entre 0° e 90° pode-se ajustar a intensidade luminosa conforme o desejado.

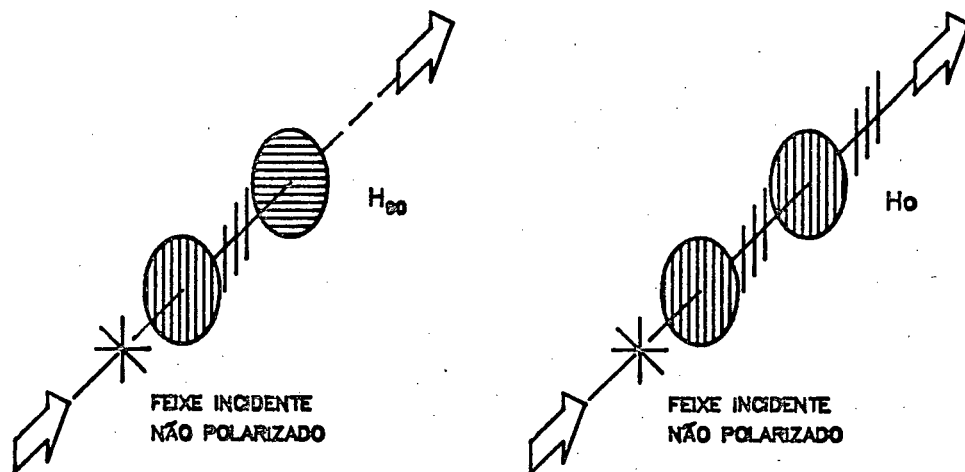


Figura 3.9 - Princípio de ajuste fino da luminosidade utilizado neste sistema. H_0 - transmissão máxima; H_{90} - transmissão mínima.

A escolha de polarizadores para o controle da luminosidade se deu em função destes serem os únicos elementos disponíveis durante a fase de desenvolvimento deste sistema ótico. Apesar de escassas, as informações obtidas sobre montagens de sistemas para o registro do arco voltaico indicaram os filtros de densidade neutra como o instrumento preferencial para atenuação da luminosidade do arco. A

propriedade que caracteriza estes filtros, e os distingue dos demais instrumentos de atenuação, consiste na independência entre o fator de atenuação e o comprimento de onda do espectro incidente. Embora estes filtros não permitam, em geral, um ajuste contínuo da intensidade luminosa, é possível que esta característica de independência exerça influência direta na escolha preferencial por estes elementos.

3.4 FILTRO INTERFEROMÉTRICO

A utilização do filtro interferométrico restringe-se aos registros fotográficos em que se deseja eliminar a radiação emitida pelo arco.

Operacionalmente, os filtros interferométricos possuem como propriedade característica a transmissibilidade da radiação em comprimento de onda único e bem definido. Estabelecendo-se uma analogia com a eletrônica, estes filtros apresentam comportamento semelhante aos filtros passa-banda.

Para esta montagem selecionou-se um filtro interferométrico compatível com o comprimento de onda do feixe laser de He-Ne. Com a utilização deste filtro consegue-se evitar a passagem da radiação em toda a faixa do espectro, com excessão do intervalo correspondente a faixa de tolerância do filtro (FWHM: 3 nm). Deve-se observar que a eliminação da radiação gerada na coluna do arco só não é total pelo fato do plasma também emitir luz no mesmo comprimento de onda do laser (fig.3.10).

Cabe observar que a presença do filtro interferométrico no sistema ótico pode resultar em:

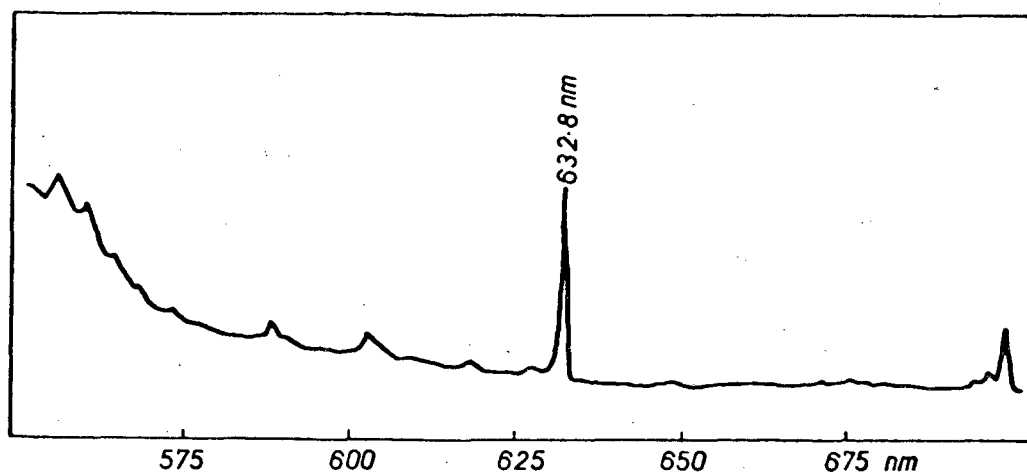


Figura 3.10 - Espectro da radiação próxima ao comprimento de onda do laser (arco TIG: 200 A / gás: argônio - laser He-Ne 20 mW) [59].

- atenuação significativa da transmitância da luz caso haja desvio angular do filtro em relação ao feixe luminoso incidente;
- aparecimento de aberrações na imagem projetada em decorrência do aparecimento de anéis de interferência.

Verificou-se que o efeito degenerativo causado pelo filtro interferométrico se torna mais significativo com o aumento do fator de ampliação da imagem. Ampliações da ordem de 8 vezes resultaram em uma diminuição acentuada na qualidade da imagem, produzindo um efeito semelhante ao encontrado na figura 3.11. A redução na resolução da imagem, provocada pela perda das noções de contorno, torna-se significativa. Diante da incapacidade de eliminar a presença de bandas de difração, considerou-se inviável a adoção de ampliações superiores a quatro para a observação visual.

Infelizmente não se tem condições de apresentar uma solução definitiva para o problema. Recomenda-se evitar a ocorrência de formação destas bandas na região de interesse da imagem, evitar

ampliações demasiadamente grandes e utilizar para o registro fotográfico lentes macro-objetivas (secção 3.6).

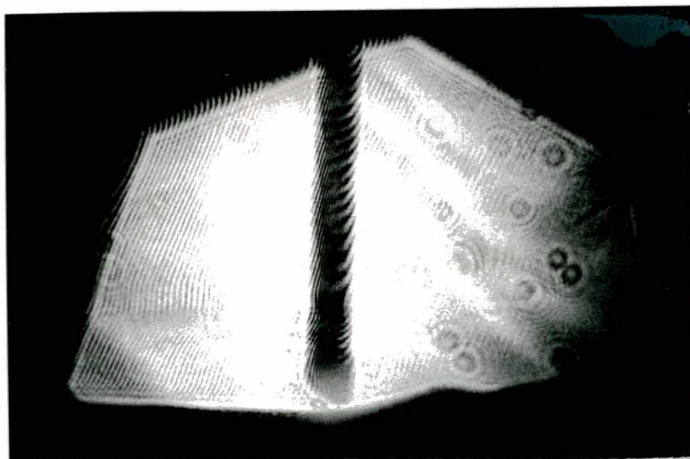


Figura 3.11 - Degeneração da imagem provocada por bandas de difração. Efeito produzido por desalinhamento do filtro espacial.

3.5 CÂMERA E LENTE FOTOGRÁFICA

Um requisito básico e de extrema importância na execução dos registros fotográficos compreende a seleção da objetiva a ser acoplada à câmera fotográfica. Além das qualidades construtivas da lente [57], características como distância focal e abertura do diafragma permitem otimizar o enquadramento e tornar mais favorável a relação entre o tamanho do objeto e o tamanho da imagem projetada sobre o filme. A seleção adequada da objetiva evita a necessidade de se ter que recorrer a ampliações excessivas do negativo para se conseguir na fotografia um tamanho razoável da imagem do arco voltaico e da gota metálica.

Para o objetivo do sistema proposto, que consiste em registrar fenômenos que possuem ordem de grandeza na faixa de 1 a

10 mm, as objetivas com distância focal de 50 ou 55 mm não se constituem na melhor opção de uso. Apesar de serem as lentes de aplicação mais difundida, estes elementos só permitem foco efetivo de objetos posicionados a uma distância mínima de 600 mm [57]. Mesmo operando na distância focal mínima, a utilização destas objetivas implica em registrar sobre a película um campo de imagem muito superior ao necessário. Em ensaios realizados com objetiva de 50 mm, obteve-se não somente a captação da imagem do arco e de regiões adjacentes muito próximas, mas de todo o ambiente circunvizinho (fig. 3.12). O resultado final apresentou a imagem do arco extremamente pequena, com a maior porção sendo composta de imagens sem o menor interesse ao estudo do arco voltaico. Com esta objetiva, a aquisição de uma imagem do arco em proporções maiores só se tornaria possível com a ampliação da imagem do negativo ou promovendo um afastamento excessivo entre a câmera fotográfica e o filtro espacial. Em ambos os casos a qualidade da imagem resultante seria extremamente prejudicada.



Figura 3.12 - Registro fotográfico obtido com objetiva de 55 mm.

A eliminação desta inconveniência pode ser obtida pela utilização de uma lente macro-objetiva. O termo "macro" se aplica a registros fotográficos onde as dimensões da imagem projetada sobre o negativo são iguais ou superiores as dimensões reais do objeto [57]. A técnica da macrografia consiste em executar um registro fotográfico com o objeto mais próximo da lente do que a película fotográfica.

Como opções de macro-objetivas, o mercado de equipamentos fotográficos oferece lentes com as mais variadas características operacionais. Entretanto, o custo de aquisição destas lentes pode ser considerado elevado, tornando, muitas vezes, proibitiva sua aquisição. Para contornar este problema, pode-se recorrer a utilização de dispositivos acopláveis à câmera fotográfica, de maneira a converter lentes objetivas de 50 ou 55 mm em objetivas para macrofotografias. Estas soluções compreendem a adição de uma lente para close, tubos expansores ou anel inversor [57]. A adição de uma lente para close é barata e conveniente, mas sua alta convergência compromete seriamente a qualidade dos resultados em função do centro e os cantos da foto não apresentarem boa nitidez. A segunda opção compreende a utilização de um conjunto de tubos intercambiáveis que permitem criar um afastamento entre a objetiva e a câmera fotográfica. Apesar de colocar a objetiva em condições de operação para a qual esta não foi projetada, normalmente os resultados obtidos são muito bons. No meio fotográfico, a utilização dos tubos expansores se constitui na opção mais utilizada para obter com objetivas normais resultados equivalentes a de macro-objetivas.

Para este trabalho decidiu-se utilizar anel inversor. Acoplado a parte dianteira da objetiva, este dispositivo faz com que a lente opere de forma invertida, permitindo realizar

macrofotografias (fig. 3.13). Em relação aos tubos expansores, a utilização do anel inversor possui vantagens e limitações. Como

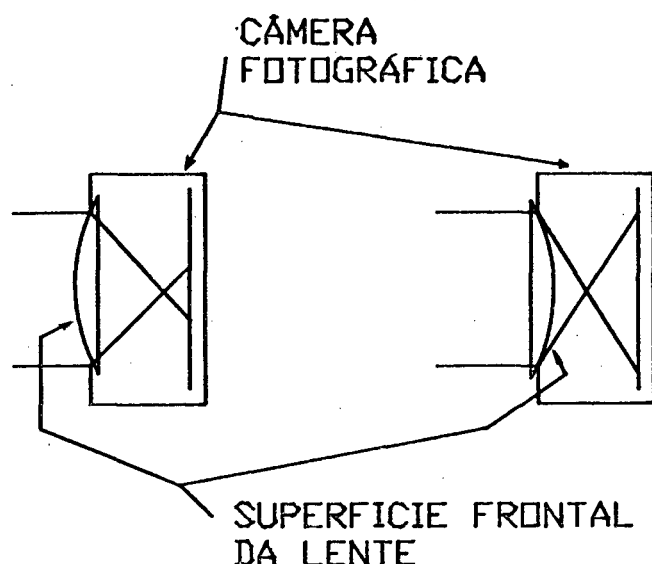


Figura 3.13 - Alteração na distribuição da luminosidade a partir da inversão da lente.

vantagem se tem a melhor qualidade da imagem, sendo inclusive, o método mais recomendado pelos fabricantes de equipamentos fotográficos. Quanto a limitação, a possibilidade de um único fator de ampliação permissível. Enquanto os tubos expansores permitem estabelecer um número de relações de ampliação correspondente a combinação dos tamanhos de tubos acoplados, a inversão da lente permite obter uma única relação entre o tamanho do objeto e o da imagem. Como os jogos de tubos expansores compreendem três peças, há a possibilidade de se estabelecer seis fatores distintos de ampliação da imagem.

Para as condições de distribuição da luminosidade produzida pelo arranjo ótico, a limitação de ampliação imposta pelo anel inversor torna-se inexistente. Uma vez que o feixe luminoso incidente na câmera é divergente a partir do filtro espacial, criam-se condições de se estabelecer um fator de ampliação atuando somente no afastamento da câmera em relação ao ponto de

convergência da luz no filtro espacial (fig. 3.14).

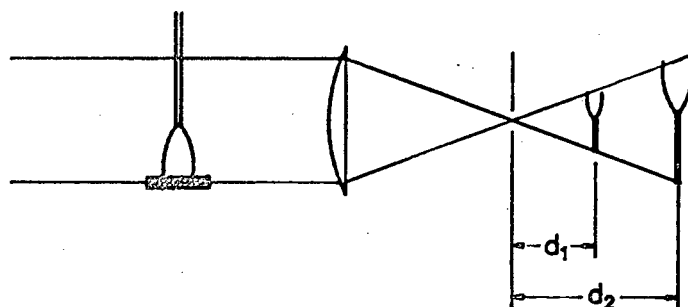


Figura 3.14 - Influência do afastamento da câmera no tamanho da imagem projetada (d - afastamento da câmera).

No que se refere à câmera fotográfica, poucos comentários podem ser feitos, restringindo-se as observações à caracterização do equipamento utilizado. Para execução dos ensaios valeu-se de uma câmera fotográfica marca Nikon modelo FE2. Uma das grandes vantagens oferecida por esta câmera é a de permitir ao operador plena independência no ajuste entre abertura e tempo de exposição. Esta característica se mostrou ser extremamente útil no decorrer dos trabalhos, uma vez que se estipulou abertura e tempo de exposição a serem utilizadas na execução das fotografias. Para fornecer uma indicação da luminosidade incidente sobre a película, valeu-se do fotômetro da câmera para fornecer recomendação do período de exposição para uma dada abertura de diafragma e sensibilidade da película utilizados.

Considera-se como característica de maior destaque a possibilidade de ajuste do período de exposição em 0,25 ms (1/4000s), muito inferior aos períodos de exposição normalmente

encontrados nas câmeras fotográficas comerciais. O desejo de se realizar os registros fotográficos com períodos de exposição nesta ordem de grandeza tornou-se o fator decisivo para a escolha desta câmera fotográfica.

Deve-se observar que um dos objetivos definidos para este trabalho consistiu em verificar a capacidade do sistema ótico em gerar as condições de luminosidade para o registro fotográfico em período de exposição próximos aos requeridos pelas câmeras de alta velocidade. Desta forma, o período de exposição de 0.25 ms se aproxima bastante dos períodos requeridos para as velocidades de 1000 e 4000 registros por segundo.

Diante de suas potencialidades, a utilização de registros fotográficos para o estudo de fenômenos do arco voltaico não se aplica exclusivamente a fotografia a alta velocidade. Tomar por base registros isolados para a determinação de diâmetro de gota em transferência por projétil ou a distribuição espacial de um arco voltaico TI6 é perfeitamente válido. Para estas aplicações, torna-se mais importante a realização de um número de registros que permitam obter um valor médio ou uma avaliação confiável. Desta forma, pode-se fazer uma distinção entre período de exposição imposto por uma necessidade de frequência de aquisição e período de exposição admissível para o registro de um fenômeno específico. Para registro a alta velocidade, períodos de exposição crescentes reduzem a frequência de aquisição e, com esta, a capacidade de acompanhamento das variações da grandeza. Para registros isolados, poderão ser utilizados equipamentos fotográficos que permitam ajustes de períodos de exposição de 1 ou 2 ms, ou até maiores, sem prejuízo da qualidade. Em cada situação, deverá ser escolhido um período compatível com a variação da grandeza que se deseja registrar. Para este tipo de aplicação não

há uma exigência operacional que implique no uso obrigatório de uma câmera fotográfica semelhante a utilizada neste trabalho, deixando-se em aberto a opção por outros equipamentos.

3.6 DEMAIS ELEMENTOS UTILIZADOS NO SISTEMA

Descrevem-se neste tópico os demais elementos óticos, dispositivos de fixação e proteção utilizados no sistema. A descrição em um único tópico se deu em razão destes elementos não necessitarem de maiores recomendações de seleção e montagem.

Com respeito a lentes, recomenda-se a escolha de elementos de boa qualidade para evitar o aparecimento de aberrações na imagem final [54]. A seleção adequada da lente plano-convexa assume importância por ser um dos elementos responsáveis na definição do diâmetro do feixe laser expandido. A escolha desta lente deve estar em concordância com a especificação da lente expansora para que o diâmetro do feixe expandido não se torne demasiado grande e venha a reduzir a capacidade do feixe laser de gerar luz de fundo (fig. 3.15).

A necessidade de introdução de elementos para proteção dos instrumentos óticos surge em função da produção de salpicos e de uma intensa liberação de calor proveniente do plasma . Para o cumprimento deste objetivo de isolamento da região do arco, introduziram-se dois anteparos dispostos perpendicularmente ao eixo ótico do sistema. Sobre cada anteparo foram abertos orifícios para permitir a livre passagem do feixe luminoso. Envolvendo estes

A necessidade de introdução de elementos para proteção dos instrumentos óticos surge em função da produção de salpicos e de uma intensa liberação de calor proveniente do plasma . Para o

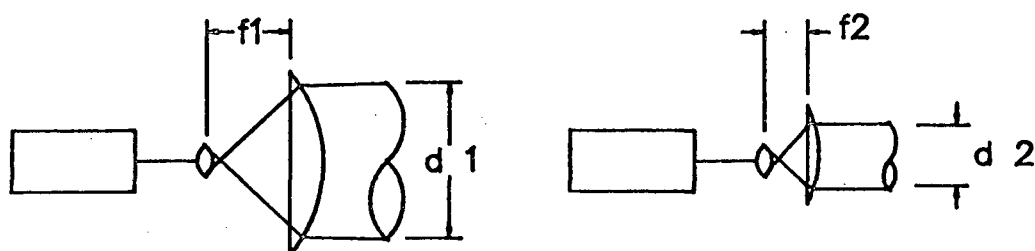


Figura 3.15 - Influência da distância focal da lente plano-convexa no diâmetro do feixe laser expandido.

cumprimento deste objetivo de isolamento da região do arco, introduziram-se dois anteparos dispostos perpendicularmente ao eixo ótico do sistema. Sobre cada anteparo foram abertos orifícios para permitir a livre passagem do feixe luminoso. Envolvendo estes orifícios foram montados dispositivos de encaixe para fixação de vidros transparente, formando uma janela no anteparo. Na montagem destas janelas seguiu-se recomendação proposta por [56], introduzindo-se um deslocamento angular de aproximadamente 5° para evitar o aparecimento de uma segunda reflexão [42,54] no caminho ótico. Quanto a qualidade superficial destes elementos, encontrou-se recomendação para utilização de vidros de superfície polida. Elementos com este grau de acabamento fornecem garantias de minimização de efeitos de distorção da imagem oriundos de irregularidades na refração. Reconhecendo-se o fato desta recomendação ser estritamente correta, por questões de custos, optou-se pela utilização de vidros de qualidade comercial. Esta opção se deu em função da presença frequente de salpicos sobre a superfície das janelas, tornando sua vida útil extremamente curta,

o que exigiria reposições frequentes. A presença de salpicos na superfície da janela promove difração do laser, resultando no aparecimento de manchas no registro fotográfico e a redução do contraste da luz de fundo com o arco voltaico. Para minimizar aberrações, adotou-se como critério de seleção destes vidros a a inspeção visual para evitar a utilização de elementos com irregularidades aparentes. Uma das maneiras factíveis de minimização do problema de salpicos sobre as janelas seria de promover um aumento no afastamento entre os anteparos e o arco voltaico. Entretanto, o requisito de manutenção de um afastamento fixo entre o objeto (arco voltaico) e o filtro espacial cria um condicionante ao posicionamento dos anteparos.

Quanto aos dispositivos de fixação, torna-se extremamente dificultoso explicitar os tipos de elementos utilizados. Em razão da variedade de modelos e formas existentes no mercado, considera-se mais apropriado recomendar uma consulta a [54,58,60] que constituem material técnico especializado no assunto referente a instrumentação ótica.

Absteve-se até o momento de se fazer comentários sobre a fonte de laser em virtude da inexistência de observações de real interesse à montagem do sistema ótico. Com excessão ao comprimento de onda da luz emitida e potência (secção 4.3), não se considerou como significativas outras características operacionais ou fontes de instabilidade [61]. Aspectos como flutuação de potência ou instabilidade espacial do feixe tornam-se insignificantes diante da flutuação de luminosidade produzida pelo plasma, sendo por isto desconsideradas.

Para se obter uma visão aprofundada sobre o princípio de funcionamento e aplicações tecnológicas das fontes de laser recomenda-se consulta as referências [54,58,61,62,63].

4 REGISTRO FOTOGRÁFICO: PROCEDIMENTOS

Neste capítulo são apresentados os procedimentos e resultados referentes a execução dos registros fotográficos. Dentre todos os aspectos envolvidos neste trabalho, considerou-se esta como a etapa onde se encontrou a maior dificuldade em alcançar progressos. Em sua maioria, os trabalhos que referenciam a utilização de sistemas óticos para registro do arco não abordam as condições de realização dos registros. Deve-se observar que a total falta de experiência sobre fotografia acabou por contribuir na dificuldade de resolução dos problemas encontrados. A execução dos registros por um técnico em fotografia certamente teria reduzido o período de desenvolvimento.

Basicamente, pode-se resumir que as dificuldades encontradas se concentraram no ajuste adequado da intensidade luminosa e na falta de repetibilidade da qualidade de imagem dos registros fotográficos. Sobre estes dois fatores será dada maior atenção, em especial no concernente ao ajuste da intensidade luminosa, por serem estes aspectos decisivos na eficiência do método de registro fotográfico.

4.1 ARCO VOLTAICO MIG/MAG

4.1.1 Ajuste da luminosidade

O procedimento de ajuste da luminosidade teve por objetivo compatibilizar a quantidade de luz incidente na câmera ao período de exposição imposto para a realização da fotografia. Operando com

o diafragma da câmera em uma abertura fixa, controlou-se a quantidade de luz por intermédio dos polarizadores. Para o ajuste destes elementos tomou-se como parâmetro de referência o período de exposição recomendado pelo fotômetro da câmera. O procedimento adotado consistiu em ajustar os polarizadores de maneira a ser obtido no fotômetro uma determinada recomendação para o período de exposição. Estando a luminosidade no valor desejado, procedeu-se a realização dos registros fotográficos ajustando períodos de exposição iguais aos recomendados.

Seguindo este procedimento, obteve-se como resultado a descaracterização da distribuição espacial do arco voltaico. A figura 4.1 apresenta um registro fotográfico obtido com período de exposição de 2 ms. Resultados semelhantes foram encontrados para períodos de exposição de 1, 0.5 e 0.25 ms. Pela observação da película, verificou-se que os registros fotográficos se apresentaram sem contraste em função de uma superexposição da película. Como esta qualidade de imagem não apresenta utilidade ao estudo do processo de soldagem MIG/MAG, introduziu-se modificações nas condições de execução dos registros.

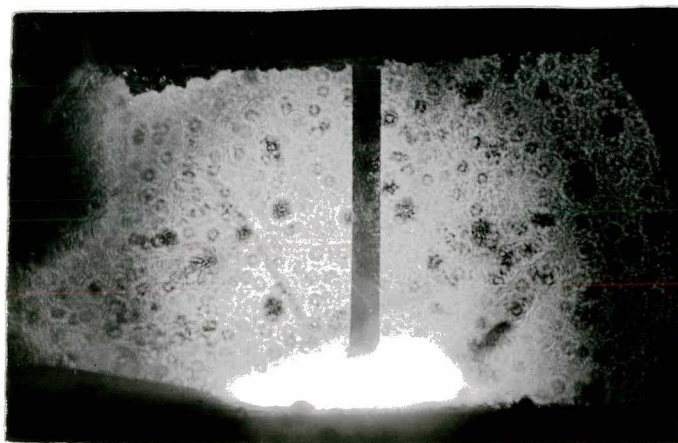


Figura 4.1 - Registro fotográfico apresentando superexposição da imagem. Período de exposição: recomendado: 2 ms
utilizado: 2ms.
Afastamento da câmera: 180 mm.

Inicialmente associou-se o efeito de superexposição encontrado a um período de exposição prolongado, provocado por um erro de medição do fotômetro da câmera. Como este instrumento executa as medições a partir da imagem formada atrás da objetiva, atribuiu-se a origem do erro às características da distribuição da luminosidade incidente na câmera fotográfica. Para o posicionamento inicial da câmera (180 mm em relação ao filtro espacial) encontrou-se uma distribuição de luminosidade incidente composta por duas regiões distintas (fig. 4.2):

- região central: composta por feixes provenientes do sistema ótico possuindo elevada densidade de potência;
- região periférica: predominância de feixes provenientes da luminosidade ambiente.

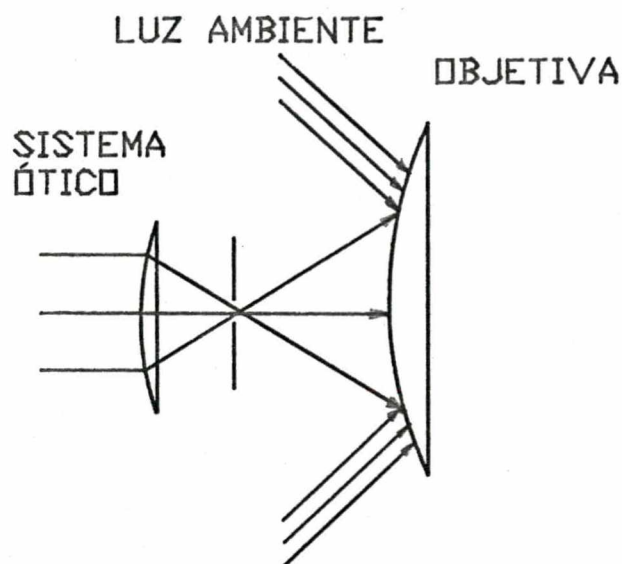


Figura 4.2 - Reperesentação da distribuição da luminosidade incidente sobre a câmera fotográfica.

Com este tipo de distribuição existe a possibilidade do fotômetro da câmera não fornecer uma medida eficiente da luminosidade. Apesar de priorizar a região central da imagem, a medida fornecida pelo fotômetro sofre influência de toda a área de luz captada.

Para obter uma informação confiável sobre o nível de luminosidade proveniente do sistema ótico recorreu-se ao auxílio de um fotômetro manual. Operando segundo o mesmo princípio de funcionamento do fotômetro da câmera fotográfica, utilizou-se este instrumento para realizar a medição em uma região mais específica. Com o fotômetro manual pôde-se executar a medição da luminosidade somente sobre a região central do feixe proveniente do sistema ótico. Ao se proceder esta leitura, verificou-se a existência de uma diferença em relação ao fotômetro da câmera. Para as mesmas condições de luminosidade, o fotômetro manual forneceu indicação de períodos de exposição inferiores aos fornecidos pelo fotômetro da câmera. Os resultados encontrados indicaram o aparecimento de um erro de exposição equivalente a $1/4$. Em outras palavras, seguindo a recomendação de exposição fornecida pelo fotômetro da câmera os registros fotográficos foram obtidos com uma incidência luminosa 4 vezes superior a necessária.

Para corrigir este erro de exposição, iniciou-se uma série de ensaios onde se introduziu um fator de correção no período de exposição indicado pelo fotômetro da câmera. Basicamente, o procedimento adotado consistiu em realizar os registros fotográficos com um tempo de abertura inferior ao recomendado pelo fotômetro. Para estes ensaios, adotou-se como procedimento fixar o tempo de abertura do diafragma em 0.25 ms. Para compatibilizar a luminosidade incidente às condições de ensaio desejadas, ajustou-se a posição angular dos polarizadores de maneira a ser obtido no fotômetro da câmera uma recomendação para período de exposição de 1 ms. Uma vez que se determinou o valor do erro de medição para um número limitado de parâmetros/variáveis de soldagem, fez-se também ensaios para outros fatores de correção ($1/2$ e $1/8$).

Realizados os ensaios, obteve-se alguns registros onde a imagem da coluna do arco apresentou-se de forma mais definida. As fig.s 4.3 e 4.4 são exemplos típicos da qualidade encontrada nos registros. Contudo, na média, considerou-se a qualidade resultante ainda insuficiente.



Figura 4.3 - Registro fotográfico do arco voltaico MIG/MAG.
Período de exposição: recomendado: 1 ms
utilizado: 0.25 ms.
Afastamento da câmera: 180 mm.

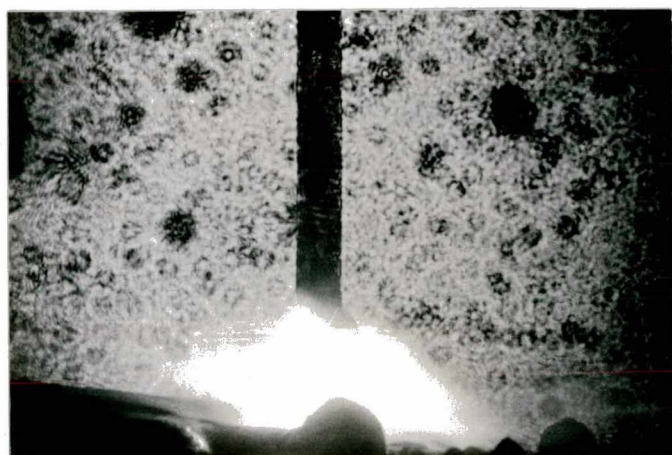


Figura 4.4 - Registro fotográfico do arco voltaico MIG/MAG.
Período de exposição: recomendado: 1 ms
utilizado: 0.25 ms.
Afastamento da câmera: 180 mm.

Obteve-se uma melhora efetiva da qualidade a partir da análise da película que deu origem a figura 4.3. A observação deste registro permitiu constatar a presença da gota metálica circundada pelo arco voltaico. Para confirmar esta observação realizou-se uma ampliação do negativo em proporção superior a normalmente utilizada. Este procedimento permitiu melhor visualizar os elementos que se desejava registrar. A melhora encontrada se deu em razão do maior contraste adquirido entre a silhueta do eletrodo, arco voltaico e luz de fundo. Contudo, a melhora na qualidade da imagem obtida com esta ampliação tornou-se limitada pelo contraste da imagem existente no negativo, que ainda apresentou baixa relação de tons.

Partindo da constatação de que a ampliação da imagem permitiu obter uma melhora na qualidade da imagem, iniciou-se uma série de ensaios onde se introduziu um maior afastamento entre a objetiva da câmera e o filtro espacial. Como descrito no item 2.4, o afastamento da objetiva da câmera em relação ao ponto de convergência da luz no orifício do filtro espacial define a ampliação da imagem projetada sobre a película fotográfica. Inicialmente fixado em 180 mm, aumentou-se este afastamento para 300 mm. Apesar deste aumento no fator de ampliação, a diferença entre as leituras fornecidas pelo fotômetro manual e fotômetro da câmera fotográfica se manteve inalterada. Por este motivo, manteve-se o critério de execução dos registros fotográficos introduzindo fatores de correção no período de exposição.

Resultados obtidos destes ensaios são apresentados nas figuras 4.5 e 4.6.

Diante dos resultados encontrados, considerou-se que o afastamento da câmera fotográfica se constitui em um fator decisivo para a obtenção de uma boa qualidade de imagem. Com este

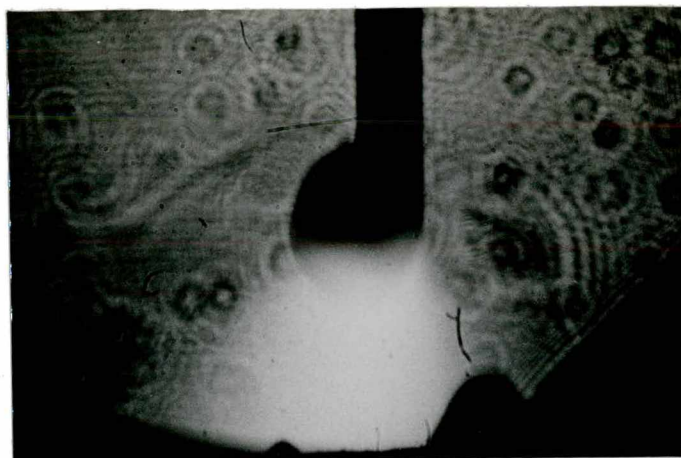


Figura 4.5 - Registro fotográfico do arco voltaico MIG/MAG.
Período de exposição: recomendado: 1 ms
utilizado: 0.25 ms.
Afastamento da câmera: 300 mm.

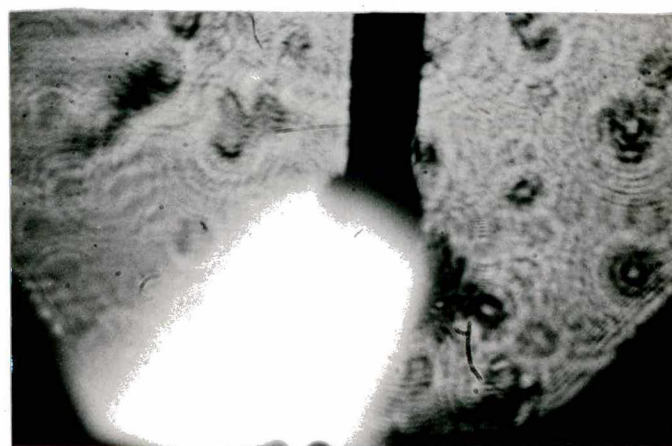


Figura 4.6 - Registro fotográfico do arco voltaico MIG/MAG.
Período de exposição: recomendado: 1 ms
utilizado: 0.25 ms.
Afastamento da câmera: 300 mm.

aumento, a parcela correspondente ao plasma e laser se tornou incidente sobre uma área maior da película fotográfica. Em qualquer situação em que se realize uma fotografia, a presença de feixes de luz concentrados em uma região muito pequena da película conduz a uma diminuição no contraste da imagem. Para esta aplicação específica, quanto mais próximo estiver a câmera do filtro

espacial, mais concentrado será a parcela do feixe proveniente do arco (fig. 4.7). Deve-se ter em mente que a imagem do arco voltaico e da gota metálica surge a partir da variação de tonalidade entre estas regiões. Eletrodo e gota metálica não emitem luz, apresentando-se no registro fotográfico como tons escuros. A imagem do arco voltaico caracteriza-se por tons claros, sendo delimitada pelos contornos da gota, peça-obra e luz de fundo. Ao operar com menor afastamento impôs-se uma maior concentração dos feixes luminosos sobre uma pequena área da película fotográfica. Com esta distribuição, as regiões escuras tornaram-se sobrepostas pelas regiões claras, resultando na falta de contraste inicialmente encontrada.

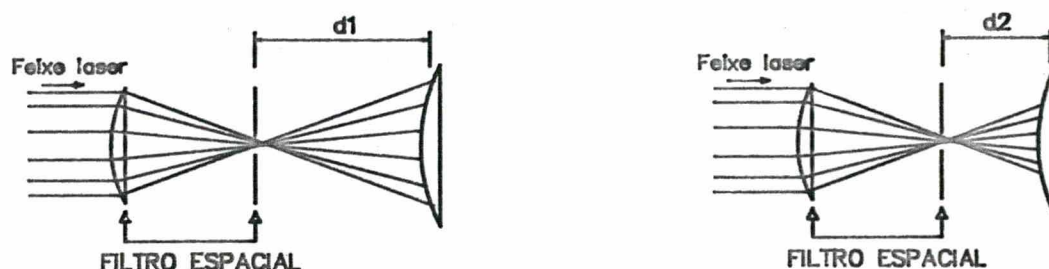


Figura 4.7 - Efeito do afastamento da câmera na distribuição da luminosidade incidente sobre a objetiva.

Quanto ao período de exposição, não se chegou a uma conclusão definitiva sobre a necessidade da introdução do fator de correção. Em termos operacionais, aumentar a defasagem entre os planos de transmissão dos polarizadores, forma necessária para reduzir a luminosidade incidente, resulta em maior densidade ótica na faixa de comprimentos de onda do laser. Apesar deste aspecto, os registros onde se obteve os melhores resultados correspondem aqueles em que se introduziu um fator de correção, em especial,

1/4. Para estes registros, as variações na emissão de luz dificultam a possibilidade de avaliar a real necessidade de sua utilização.

Dentre os aspectos analisados, a eficiência do método de registro do arco voltaico está intimamente relacionada com a determinação do posicionamento da câmara e, caso se julgue apropriado, do fator de correção do período de exposição. Para esta montagem experimental obteve-se melhor qualidade de imagem para 0,25 e 300 mm, respectivamente para fator de correção de tempo de exposição e afastamento da câmara. Deve-se expressar de forma clara que estes valores aplicam-se exclusivamente a esta montagem experimental. Para outras montagens, em que sejam utilizados elementos diferentes, novos fatores deverão ser obtidos experimentalmente. Isto ocorre em função de variáveis como densidade de potência da luz de fundo, distância focal da lente que compõe o filtro espacial e características óticas da lente macro-objetiva da câmara influírem de forma decisiva sobre o fator de correção e afastamento da câmara.

4.1.2 Variação na qualidade de imagem

A variação na qualidade da imagem do arco voltaico MIG/MAG operando no modo de transferência por curto-circuito é um aspecto que merece ser comentado.

Durante a realização dos ensaios verificou-se o aparecimento de variações na qualidade de imagem de registros fotográficos obtidos sob as mesmas condições experimentais. A figura 4.8 permite exemplificar esta variação. Distingue as figuras 4.8a e 4.8b unicamente o instante em que se executou os registros.

Considera-se que os resultados apresentados possuem qualidades distintas pois a figura 4.8a apresenta o arco voltaico com contornos nítidos enquanto na figura 4.8b a região ionizada assumiu aspecto indefinido.

Com base nos resultados, creditou-se esta falta de repetibilidade a uma impossibilidade dos polarizadores de acompanharem as variações dinâmicas da emissão da luz do arco,

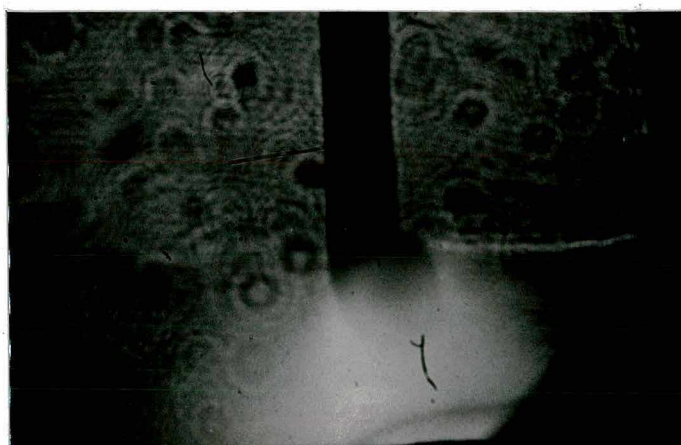
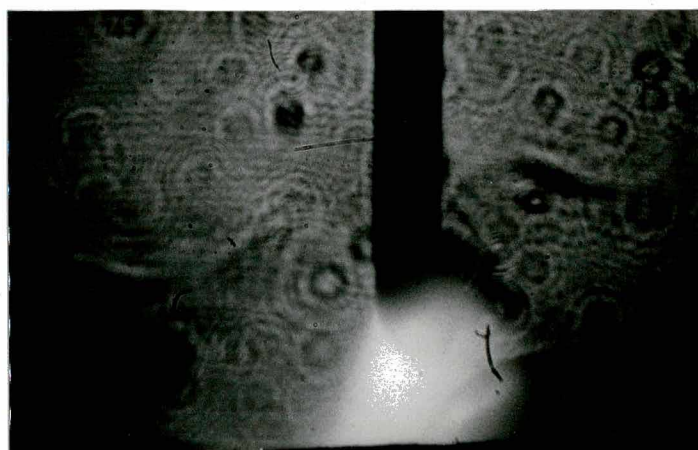


Figura 4.8 - Variação na qualidade de imagem dos resultados. Registros fotográficos obtidos sob mesmo ajuste de luminosidade e tempo de exposição.
Período de exposição: recomendado: 0,5 ms;
utilizado: 0,25 ms
Afastamento da câmera: 300 mm.

variações estas impostas pela transferência por curto-circuito. Neste modo de transferência, a cada instante ocorrem variações na intensidade, espectro e na própria distribuição espacial do arco voltaico. Entretanto, apesar destas mudanças, os polarizadores só podem ser ajustados pelo valor médio da luminosidade, impossibilitando, portanto, que a atenuação acompanhe o caráter dinâmico da emissão da luz. Desta forma, não existem garantias de que a cada instante a atenuação da luminosidade se processe da forma mais eficiente. Acredita-se que este problema de falta de repetibilidade não se aplique exclusivamente aos instrumentos de atenuação empregados neste sistema. Mesmo com a utilização de filtros de densidade neutra se estaria sujeito a ocorrência deste efeito, uma vez que, da mesma forma que os polarizadores, o ajuste da intensidade luminosa continuaria a ser feito com base no valor médio da luminosidade. A utilização dos polarizadores pode, isto sim, agravar esta tendência de variação em virtude da atenuação ocorrer de forma diferenciada nos diversos comprimentos de onda do espectro. De uma forma geral, não se conhece nenhum instrumento de atenuação com capacidade de acompanhamento das variações na intensidade luminosa em tempo compatível com o requerido para a execução dos registros fotográficos. Em transferência por curto-circuito, a ocorrência variações na qualidade de imagem é uma realidade que deve ser aceita.

4.1.3 Influência da luz de fundo

Para a realização dos registros fotográficos do arco voltaico MIG/MAG operando no modo de transferência por curto-circuito, a presença da luz de fundo pode ser considerada imprescindível. Para as condições de ensaio aplicadas, verificou-se uma incapacidade do

arco voltaico em gerar luz suficiente para permitir períodos de exposição compatíveis com o exigido pela fotografia a alta frequência. Somente com a luz própria do arco, as medidas do fotômetro indicaram períodos de exposição não inferiores a 2 ms. Na figura 4.9 são apresentados registros fotográficos onde se buscou verificar a qualidade de imagem obtenível ao se promover uma subexposição. Para os registros apresentados nesta figura, obtidos sob ajuste de tensão e velocidade de alimentação do arame de 21 V e 4.0 m/min (120 A) respectivamente, a luminosidade incidente resultou na indicação de um período de exposição de 4 ms. Para a execução destes registros, ajustou-se o tempo de disparo do obturador da câmera para um período de exposição inferior aos 4 ms recomendados. Distingue os dois registros o fator de subexposição aplicado, sendo 1/4 e 1/8 do valor recomendado para as figuras 4.9a e 4.9b, respectivamente. Além de resultar em granulação, não existem condições de delineamento dos contornos do arco voltaico. A comparação destes resultados com aqueles em que se manteve a presença da luz de fundo permite constatar a influência que esta exerce sobre a qualidade dos resultados. Para esta situação específica, a presença do laser permitiu realizar os registros como descrito no item 4.2, tornando possível a definição dos contornos da região ionizada (fig. 4.6).

Ao afirmar que a presença da luz de fundo é imprescindível leva-se em consideração que:

- somente com a luz própria do arco, o período de exposição assume valores incompatíveis com a frequência de aquisição exigida para os registros;
- nos períodos de extinção do arco não ocorre a emissão de luz; por conseguinte, a menos que haja luz de fundo, torna-se

impossível registrar o processo de transferência;

- a luz de fundo permite gerar um maior contraste da região adjacente do arco, tornando visível a extensão do eletrodo e alguns detalhes da superfície da peça-obra, este último em menor grau.



Figura 4.9 - Registro fotográfico do arco voltaico sem a presença da luz de fundo.

Período de exposição: recomendado: 2 ms;
utilizado: a - 0,5 ms;
b - 0,25 ms.

Afastamento da câmera: 300 mm.

Cabe observar que o período de exposição recomendado pelo fotômetro pode ser influenciado pela sensibilidade da película fotográfica selecionada. Películas de maior sensibilidade permitem que, para a mesma luminosidade média, haja uma redução no período de exposição recomendado. Como exemplo, para as mesmas condições em que se realizaram os registros fotográficos apresentados na figura 4.9, a utilização de película com sensibilidade 1600 ISO reduziria o período de exposição recomendado de 4 para 1 ms. Entretanto, utilizar películas fotográficas de maior sensibilidade com o objetivo de reduzir o período de exposição não torna dispensável a utilização da luz de fundo. Sem esta fonte se mantém a impossibilidade de registrar a transferência nos instantes em que há extinção (fig. 4.10), assim como a visualização da região próxima ao arco é praticamente nula. Além deste aspecto, as películas de maior sensibilidade apresentam tendência à granulação. Estas películas destinam-se, fundamentalmente, ao registro fotográfico em condições de baixa luminosidade e períodos de exposição superiores aos requeridos no registro do arco voltaico MIG/MAG. Para estes ensaios se optou por películas de sensibilidade 400 ISO, consideradas películas rápidas, em função destas aliarem contraste de imagem a períodos de exposição relativamente pequenos.

No que se refere a luz de fundo, considerou-se que a utilização de uma fonte laser de 10 mW, em detrimento a lasers de menor potência (1-5 mW), permitiu obter uma melhora significativa na qualidade da imagem dos registros fotográficos. Comparativamente aos resultados obtidos por Allemand [56], considerou-se os registros fotográficos obtidos com melhores características de definição de imagem. Faz-se esta consideração, em função dos registros apresentarem imagens mais nítidas, tanto

no que se refere aos contornos do arco voltaico, quanto na forma da gota metálica.

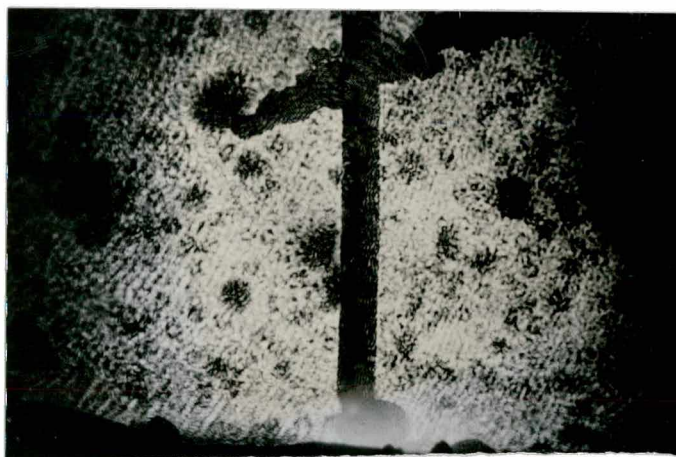
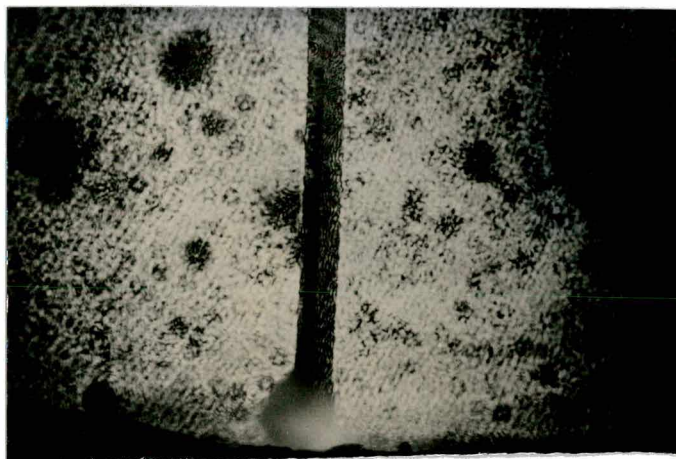


Figura 4.10 - Registros fotográficos da transferência metálica no instante do curto-circuito.

O uso de uma fonte laser de 10 mW se mostrou inconveniente somente para o registro do arco voltaico de baixa potência elétrica, em razão da luminosidade do laser haver sobrepujado a luminosidade produzida pelo arco voltaico. Efeito semelhante deve ser esperado para arco voltaico MIG/MAG de baixa potência, uma vez

que, no que se refere a emissão luminosa, os dois processos possuem comportamento semelhante.

Mesmo existindo limitações para o registro de arcos voltaicos de baixa potência, para seleção da fonte laser julga-se mais apropriado optar por fontes que emitam feixes de potência mais elevada pois permitem aumentar o contraste da imagem e reduzir o período de exposição recomendado. Caso a luz de fundo se torne mais potente que a própria luminosidade do arco, existe o recurso de atenuar a intensidade do feixe laser de forma apropriada. Garante-se desta forma que, ao se tornar necessário o registro de arcos de potência mais elevada, a fonte laser preencherá os requisitos necessários.

4.2 TRANSFERÊNCIA METÁLICA

Comparativamente a execução dos registros fotográficos do arco voltaico, a aquisição de imagens da transferência metálica impõem menor grau de dificuldade. Como o filtro interferométrico elimina, em sua quase totalidade, a radiação emitida pelo arco, a luminosidade que incide sobre a película se caracteriza por uma densidade de potência uniforme. Para a aquisição de imagens da transferência, com excessão aos problemas gerados pelo filtro espacial, não se observou qualquer outra característica que viesse a causar prejuízo na qualidade da imagem.

Para as condições de luminosidade geradas pela fonte laser, tornaria-se possível a utilização de película fotográfica de menor sensibilidade. Este fato surge como decorrência da necessidade surgida de recorrer ao uso dos polarizadores para promover a redução na luminosidade, de forma a compatibilizá-la com o período

de exposição de 0.25 ms.

Na figura 4.11 é apresentada uma sequência de registros que permitem avaliar a funcionalidade do sistema para a aquisição de imagens da transferência metálica. Apesar dos registros se apresentarem em sequência cronológica, estes não correspondem a estágios de desenvolvimento da transferência de uma mesma gota. Como citado no capítulo 1, para a execução destes ensaios não se dispôs de um equipamento fotográfico com capacidade de aquisição dos registros em frequência compatível com a variação da transferência metálica. Mesmo assim, considera-se o sistema ótico perfeitamente capaz de propiciar luminosidade para o registro a alta frequência. Baseia-se esta afirmativa no fato dos registros que compõem a figura 4.11 terem sido realizados com período de exposição de 0.25 ms estando, portanto, na faixa de período exigido pelas câmeras de alta velocidade.



Figura 4.11 - Sequência de registros fotográficos da transferência metálica no processo MIG/MAG.

4.3 ARCO TIG

Para a aquisição de registros fotográficos do arco TIG, a presença da luz de fundo pode ser dispensada (fig. 4.12). Como neste processo não existe transferência metálica, torna-se possível a execução de registros fotográficos com períodos de

exposição superiores aos requeridos no registro do processo MIG/MAG. Além deste aspecto, o arco possui estabilidade espacial e regularidade na emissão de luz o que resulta em grande repetibilidade na qualidade da imagem.

Estas características permitem que o arco voltaico TIG sirva de instrumento à análise da influência do período de exposição sobre as dimensões da imagem formada na película fotográfica. Ao



Figura 4.12 - Registro fotográfico do arco TIG sem a presença da luz de fundo. Período de exposição: 2ms.

serem feitos registros com variações crescentes no período de exposição (fig 4.13), encontrou-se uma relação de crescimento exponencial nas dimensões do arco voltaico (fig. 4.14). Embora o número de pontos experimentais obtidos seja reduzido, a tendência apresentada indica a existência de um período de exposição mínimo, acima do qual a imagem registrada não sofre mais alterações em suas dimensões. Estes resultados corroboram com afirmações feitas por Glicstein [64].



Figura 4.13 - Variações nas dimensões do arco voltaico em função do período de exposição: a) 0.5 ms; b) 1 ms; c) 2 ms. Período de exposição recomendado: 2ms.

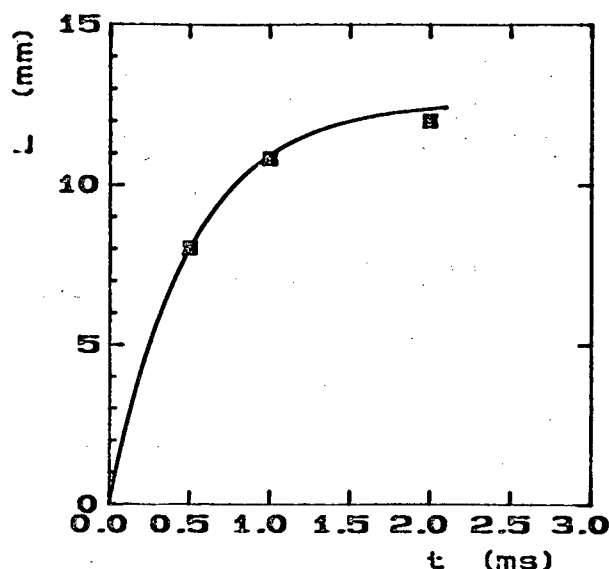


Figura 4.14 - Relação entre as dimensões da imagem (L) e período de exposição (t).

Este comportamento abre um campo específico de pesquisa visando a utilização dos registros fotográficos no estudo dos fenômenos dos processos de soldagem. Somente a partir da determinação da influência que as variáveis do processo exercem sobre o posicionamento das curvas é que poderão ser tomados registros fotográficos para a análise das características do arco voltaico. Uma possibilidade que surge é a de direcionar esta pesquisa no sentido de procurar criar uma metodologia que permita correlacionar período de exposição e dimensões da imagem para as várias condições de operação do arco.

Cabe observar que a determinação destas relações por si só não fornecem garantias que dimensão registrada corresponda as reais dimensões do arco voltaico. A correlação efetiva só poderá ser obtida a partir da comparação das dimensões da imagem com as do objeto (arco). Entretanto, análises envolvendo a determinação da composição da atmosfera com base no espectro de radiação emitida [53] ou aspectos qualitativos da distribuição espacial [64] são informações de interesse ao estudo do arco voltaico, o que já justifica o desenvolvimento futuro desta pesquisa.

Para o processo MIG/MAG torna-se difícil determinar as relações entre período de exposição e dimensões da imagem pois:

- existem variações nas condições de emissão de luz;
- há necessidade da presença da luz de fundo para permitir a aquisição em frequência compatível com as variações na transferência metálica;
- dificuldade, inerente, de determinar as dimensões reais do arco voltaico.

Por estas características, acredita-se que a utilização de registros fotográficos do arco voltaico MIG/MAG possua um campo de aplicação limitado à análise qualitativa da distribuição espacial do arco voltaico.

4.4 REVELAÇÃO

O processo de revelação pode ser considerado o desfecho do procedimento de realização dos registros fotográficos. Citando apenas como referência, a revelação é o processo em que cristais (haletos de prata) expostos a luz são convertidos em imagem visível através de um banho químico contendo agentes redutores [57]. Para uma revelação produzir resultados satisfatórios, alguns fatores são essenciais, entre eles, o uso de revelador compatível com o material a ser processado, um rigoroso controle de tempo e temperatura da revelação, e uma agitação adequada.

Para este trabalho optou-se pela utilização de um processo padrão para a revelação da película, seguindo recomendação do fabricante do revelador. Embora alterar este procedimento, usualmente tempo de banho, permite realçar ou reduzir o contraste

da imagem, adotou-se este procedimento em função de:

- esta alteração exige um conhecimento prático elevado para que o período de banho não se estenda e provoque a degeneração da imagem registrada no negativo;
- possibilidade de, ao modificar-se para cada registro o procedimento de revelação, provocar-se alterações nas características da imagem em efeito semelhante ao encontrado para período de exposição (item 4.4).

5 RELAÇÕES PARAMÉTRICAS TENSÃO / CORRENTE

Conceitualmente as curvas características estáticas indicam o comportamento elétrico do arco num dado comprimento, sendo definidas pela associação do par tensão-corrente em um comprimento de arco específico. Apesar deste conceito ser amplamente utilizado, sua aplicação na determinação de curvas características para o modo de transferência por curto-circuito implica em um elevado grau de dificuldade em função das variações que ocorrem no comprimento do arco voltaico.

Neste capítulo procura-se mostrar, partindo do conceito de curvas características estáticas do arco, a utilização de metodologia alternativa para a determinação de relações paramétricas entre tensão e corrente de soldagem para a transferência metálica por curto-circuito.

5.1 DEFINICAO DE COMPRIMENTO DO ARCO

Clássicamente, define-se comprimento do arco como a menor distância compreendida entre a superfície da poça de fusão e a extremidade inferior do eletrodo (fig. 5.1). Ao ser definido desta forma se desconsidera a característica do arco voltaico não ser pontual em suas extremidades. Como descrito no capítulo 2, a interface entre o arco voltaico e o cátodo tende a se estabelecer na periferia da poça de fusão ou abranger uma área sobre esta. Independente da atmosfera protetora utilizada, a interface catódica não se concentra em um ponto imediatamente abaixo do eletrodo. Na outra extremidade, a interface do arco junto ao ânodo

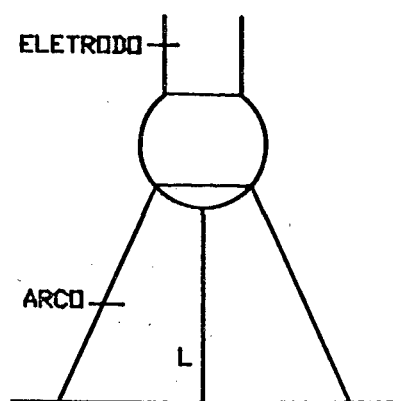


Figura 5.1 - Definição clássica do comprimento do arco (L) [24].

abrange igualmente uma superfície, não se concentrando em um ponto sob a extremidade inferior do eletrodo. De forma similar à interface catódica, o tamanho da interface anódica depende de uma série de parâmetros e variáveis de soldagem. Para fins de correlação com tensão e corrente, a definição de comprimento do arco como a menor distância entre os eletrodos constitui uma aproximação, uma vez que considera que a queda de tensão e passagem de corrente se concentram unicamente entre dois pontos (fig. 5.2).

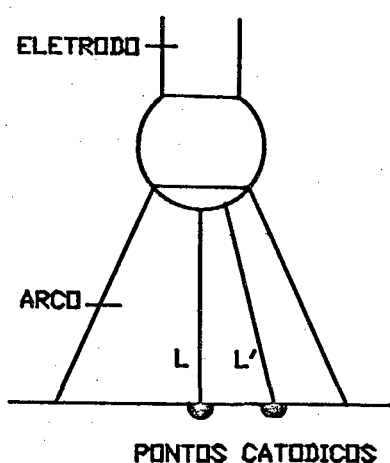


Figura 5.2 - Esquema comparativo entre a situação real do arco (L) e a simplificação do comprimento do arco (L') [24].

5.2 DEFINIÇÕES E MÉTODOS ADOTADOS

A definição de um procedimento aplicado à determinação das curvas características estáticas exige que sejam adotadas algumas aproximações de forma a viabilizar a execução dos experimentos. A primeira destas aproximações se relaciona com a determinação das variáveis elétricas de soldagem. Como as curvas características procuram correlacionar o comprimento do arco com estas variáveis, torna-se necessário proceder a aquisição dos valores referentes a queda de tensão no arco voltaico. Entretanto, apesar desta necessidade, o procedimento convencional para determinação desta variável não permite a medição, somente, da parcela referente a coluna do arco. Usualmente, procede-se a determinação da queda de tensão de uma forma global, levando em consideração a queda de tensão no tubo de contato, extensão do eletrodo e no arco voltaico. Encontram-se referências a métodos experimentais aplicados à determinação da queda de tensão na extensão do eletrodo [65] e no próprio arco voltaico [31]. Contudo, estes métodos possuem limitações em aplicação, sendo utilizados em condições de transferência por projétil ou arco TIG onde não se encontram alterações significativas nas dimensões físicas e variáveis elétricas do arco voltaico.

Mesmo ao ser considerado como a distância entre o ânodo e o cátodo, a determinação do comprimento do arco em processos de soldagem que utilizem eletrodos consumíveis ainda implica em um alto grau de dificuldade. Usualmente, esta determinação se aplica com maior facilidade ao processo de soldagem em função da possibilidade de fixação prévia do afastamento entre os eletrodos e a inexistência de transferência metálica. Já o processo de soldagem MIG/MAG não permite tamanha facilidade. Como o arco

voltaico se forma a partir de um eletrodo consumível, o comprimento do arco passa a depender do equilíbrio entre a velocidade de alimentação do arame e sua velocidade de fusão. A cada gota formada, o arco voltaico sofre uma redução em seu tamanho como decorrência direta do aumento do volume da gota metálica. Dependendo do modo de transferência, esta variação no comprimento do arco pode ou não se tornar significativa. Em transferência por projétil, apesar da gota assumir dimensões da ordem de 1 mm, as variações no comprimento do arco (fig. 5.3) não produzem alterações significativas na tensão ou corrente de soldagem (fig. 5.4). Este comportamento permite que estas possam ser desprezadas, podendo a grandeza ser definida como o

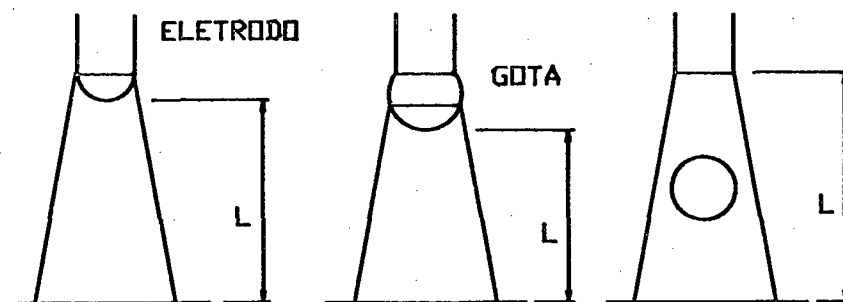


Figura 5.3 - Efeito de redução no comprimento do arco (L) em transferência por projétil.

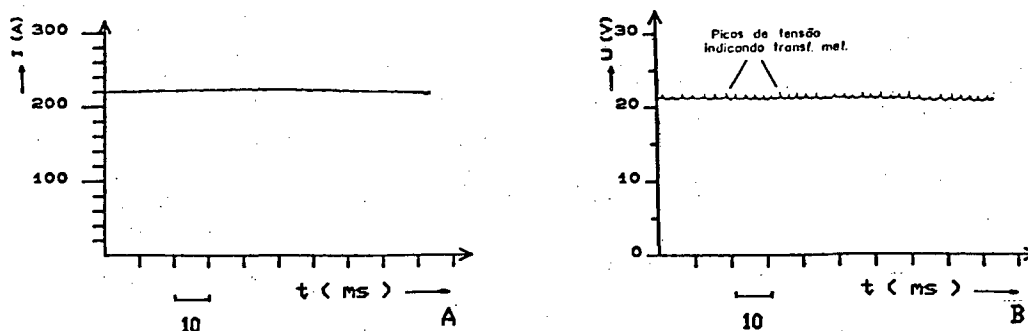


Figura 5.4 - Oscilogramas de a) corrente e b) tensão em transferência por projétil.

afastamento entre a linha de fusão e a superfície da peça metálica [66]. Aceitando esta aproximação, a determinação do comprimento do arco pode ser considerada relativamente simples, podendo ser feita pela observação visual do processo de soldagem. Como pontos de referência à medição, podem ser tomados a extremidade do eletrodo e superfície da peça-obra [66]. A escolha destes pontos implica em considerar a existência de duas fontes de erro. A primeira, já citada, refere-se ao comprimento medido não corresponder ao real caminho de movimentação dos eletrons. A segunda fonte de erro decorre do fato do cátodo de se formar em uma cratera no interior da poça de fusão. Desta forma, a raiz catódica situa-se em algum nível abaixo da superfície da peça-obra. Avaliações feitas por Tuthill [66] indicaram profundidades de crateras não superiores a 1,5 mm em faixas de corrente de 350 A. Deve-se observar que a eliminação destas fontes de erro não se constitui em uma tarefa fácil. Fotografia a alta velocidade ou filmagem com câmeras CCD são técnicas igualmente suscetíveis a estes erros.

As variações no comprimento do arco provocadas pelo aumento no volume da gota assumem importância na transferência por curto-circuito (fig. 5.5). Neste modo de transferência, o comprimento do arco varia desde um valor máximo, logo após a reignição (fig. 5.5a), até um valor mínimo, no momento do curto (fig. 5.5d), conduzindo tensão e corrente de soldagem a um comportamento característico (fig. 5.6). Para este modo de modo de transferência, definir o comprimento do arco como a menor distância entre o ânodo e o cátodo implica na necessidade utilização de um sistema com capacidade de aquisição da grandeza em frequência compatível com sua variação. Diante da impossibilidade de utilização de um equipamento de medição com tais características, decidiu-se adotar como definição do

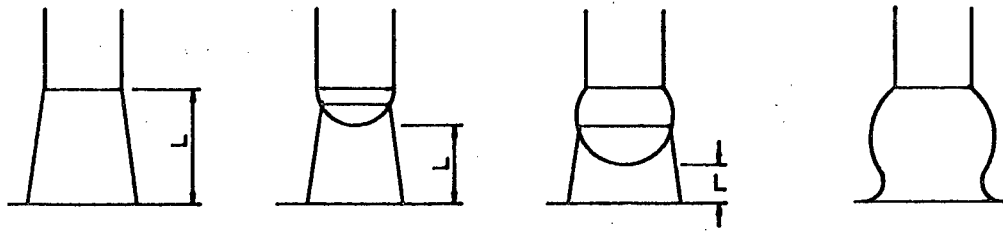


Figura 5.5 - Efeito de redução no comprimento do arco (L) em transferência por curto-circuito.

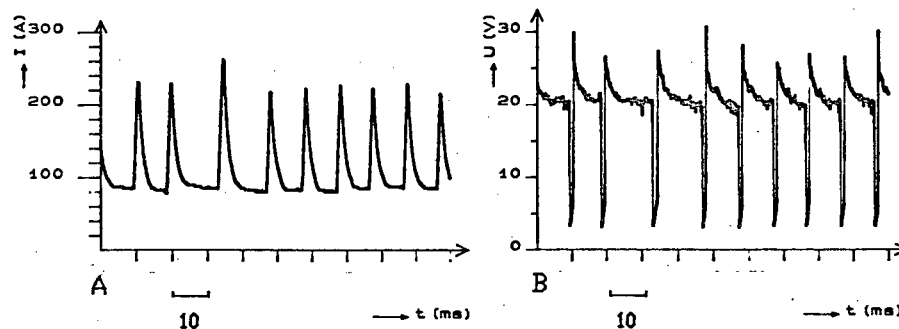


Figura 5.6 - Oscilogramas de a) corrente e b) tensão em transferência por curto-circuito.

comprimento do arco o afastamento entre a linha de fusão e superfície da poça metálica. Embora não retrate fielmente a grandeza, considera-se este afastamento como representativo em função deste determinar o tamanho da gota [17], influenciando, com isto, as características da transferência. De forma similar ao procedimento adotado por Tuthill [18], tomou-se como pontos de referência das extremidades do arco a superfície da peça-obra e extremidade do eletrodo. Cabe salientar que as avaliações feitas por Tuthill [18] sobre a profundidade de cratera se aplicam ao processo de soldagem operando com valores de corrente muito superiores àqueles empregados neste trabalho.

5.3 REALIZACAO DOS ENSAIOS

O procedimento adotado para a realização dos ensaios consistiu em fixar velocidades de alimentação do arame e atuar sobre a tensão de maneira a variar o comprimento do arco. Na tabela 5.1 são apresentadas as condições experimentais em que se realizaram os ensaios.

gás de proteção	75% argônio/ 25% CO ₂
Altura da tomada de corrente	15 mm
diâmetro do eletrodo	1.0 mm
velocidade de soldagem	300 mm/s
efeito indutivo	60 KA/s
modulação da fonte	tensão constante
velocidade de alimentação do arame	2,5-4,0-6,0-7,0m/min

Tabela 5.1 - Condições de realização dos ensaios

Para a realização dos experimentos valeu-se dos recursos de aquisição e processamento de dados fornecidos pelo SISDATASOLDA [8]. Com este sistema fez-se as aquisições dos sinais de tensão e corrente de soldagem a uma frequência de 4 KHz. Para obter informações concernentes a regularidade da transferência por curto-circuito, utilizou-se o software aplicativo SOLTE [8]. Com base na análise oscilográfica de tensão e corrente de soldagem, o programa SOLTE fornece um indicativo da regularidade, tomando por base o período de transferência (TT), o tempo de duração do curto-circuito (TC) e os picos de corrente (IP) - (fig. 5.7).

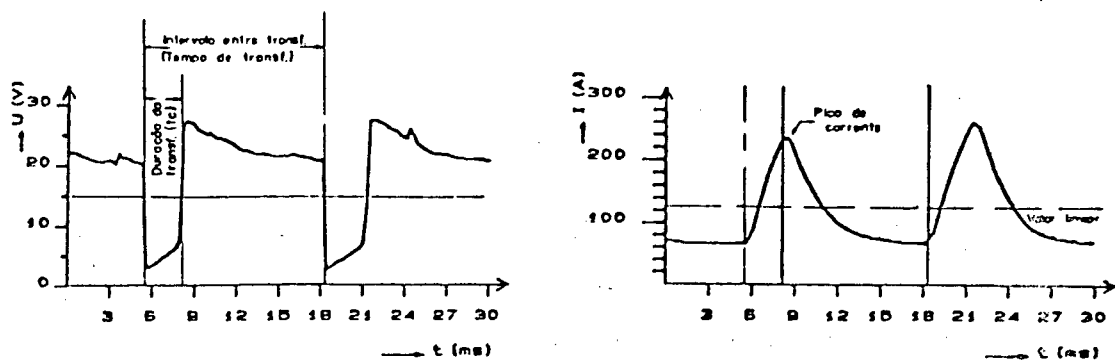


Figura 5.7 - Parâmetros representativos da regularidade: a) corrente de pico (IP); b) tempo de transferência (TT); c) tempo modal de curto (TC) [8].

Em função de seu caráter cíclico, a definição de um critério de estabilidade deve se basear na uniformidade da transferência de gotas do arame à poça de fusão [47]. Quanto mais regular o processo de transferência, mais uniforme a deposição de material [67]. A regularidade dos parâmetros selecionados é quantificada pelo desvio-padrão. A seleção deste elemento se dá em função de sua representatividade no que se refere a dispersão dos parâmetros IP, TMT e TMC. Quanto maior o desvio-padrão, mais irregular o processo de transferência. Para efeito de cálculo, a metodologia assume que os três parâmetros selecionados possuem distribuição normal de probabilidade. Além destes parâmetros, o aplicativo utilizado forneceu os valores do diâmetro médio de gota, calculados com base na frequência de transferência [8].

Para a determinação do comprimento do arco implementou-se no sistema ótico descrito no capítulo 3 um anteparo calibrado (fig 5.8). Em comparação com o sistema utilizado por Tuthill [66], o sistema ótico, tendo laser como luz de fundo, apresenta melhores condições de medição. A possibilidade de eliminação da radiação visível emitida pelo plasma torna possível formar uma imagem composta exclusivamente pela silhueta do eletrodo e peça-obra. O

efeito resultante se assemelha ao registro fotográfico apresentado na figura 3.4 (capítulo 3).

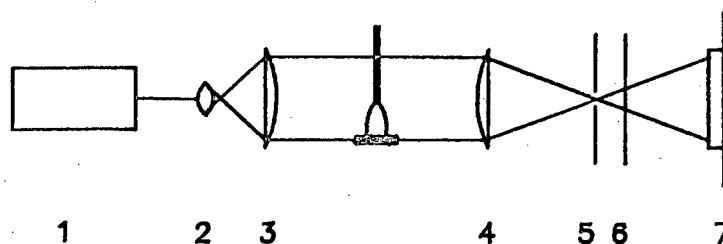


Figura 5.8 - Esquema de montagem do sistema para medição do comprimento do arco: 1- laser; 2- expansor; 3- lente plano-convexa; 4,5- filtro espacial; 6- filtro interferométrico; 7- anteparo calibrado.

Apesar da grandeza comprimento do arco possuir um comportamento dinâmico, a medição com base na observação visual torna-se possível pela característica da linha de fusão, que corresponde ao limite inferior da extremidade sólida do eletrodo, manter um afastamento aproximadamente constante com o decorrer da transferência. Por ser feita com base na observação visual, a leitura que pode ser obtida pelo sistema corresponde a um valor médio do comprimento do arco. Caso se estivesse analisando um processo de transferência controlado, como por exemplo, o processo MIG pulsado, poderia-se aprimorar o sistema ótico criando um efeito estroboscópico. Contudo, a transferência por curto-circuito possui um caráter irregular, o que dificulta a utilização deste efeito.

Em termos do ideal desejado, o sistema utilizado apresenta uma característica que limita a qualidade dos resultados adquiridos. Esta limitação decorre do fato do processo de medição ser feito com base na observação visual do anteparo calibrado. Esta característica torna impossível a determinação dos valores instantâneos da grandeza de medição. Caso houvesse disponibilidade de uma câmera fotográfica de alta velocidade, ou mesmo uma câmera

CCD, poderia-se obter melhores resultados. A execução das leituras a partir de registros fotográficos permitiria a determinação dos valores instantâneos do comprimento do arco. Contudo, deve-se observar que o processo de transferência por curto-circuito se caracteriza por ser um processo não controlado. Isto implica no aparecimento de variações nas grandezas da ordem de 10 a 20 %, mesmo nas melhores condições de transferência. Por este motivo, mesmo com a utilização de um sistema com capacidade de aquisição dos valores instantâneos da grandeza, encontraria-se resultados com incerteza de medição de 10 a 20%. Apesar destas variações, admite-se que a utilização de registros fotográficos permitiria obter resultados de maior confiabilidade.

Para avaliar os erros de medição do sistema, procedeu-se a sua calibração. Iniciou-se este procedimento pela calibração do anteparo de medição com o objetivo de determinar a incerteza de posicionamento dos traços da escala de leitura. Para esta primeira etapa de calibração, selecionou-se como sistema de medição padrão um projetor de perfil, por se considerar este instrumento o mais adequado à medição do afastamento dos traços. O processo de calibração foi feito para a faixa de leitura de 0 a 5 mm sobre a região mediana dos traços. Na tabela 5.2 são apresentados os resultados obtidos da calibração.

1 CICLO	2 CICLO	3 CICLO
4.000	4.000	4.005
4.005	4.010	3.980
4.000	4.000	4.000
3.995	4.000	4.000
3.995	3.995	4.010

RM: 3.99 ± 0.09 mm

Tabela 5.2 - Resultados de calibração da escala de medição

A segunda etapa de calibração consistiu na determinação do fator de ampliação do sistema de medição. Basicamente, este procedimento de calibração destinou-se a:

- encontrar o posicionamento do anteparo ao longo do eixo ótico do sistema para a obtenção da imagem com ampliação de 4 vezes;
- a determinação dos erros de medição do sistema

Para esta segunda etapa de calibração selecionou-se como padrão um conjunto de blocos-padrão. Para execução das medições, utilizou-se uma ponteira de alumínio de 2 mm de diâmetro com extremidade afiada (30°) para simular o eletrodo consumível. Optou-se por ponteira de alumínio uma vez que a utilização de eletrodo de tungstênio poderia promover a danificação da superfície do bloco-padrão. Evitou-se a utilização do arame de alimentação em razão da pequena rigidez apresentada por este. O processo de calibração foi conduzido de maneira a obter um afastamento entre uma superfície de referência e a extremidade do eletrodo. A curva de calibração obtida é apresentada na figura 5.9

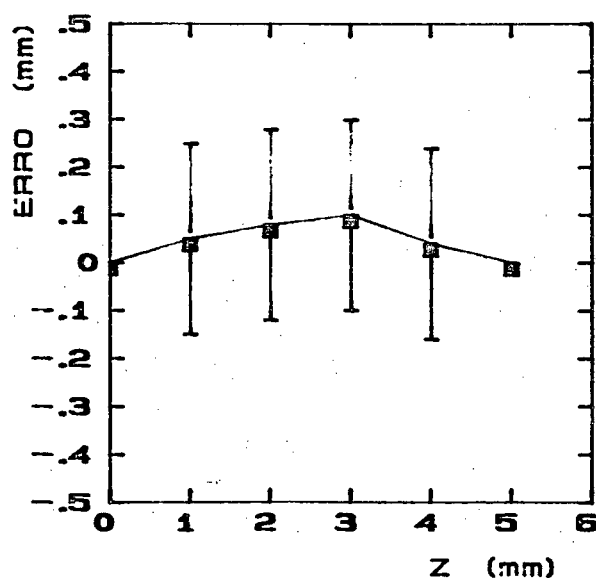


Figura 5.9 - Curva de calibração do sistema de medição

5.4 RESULTADOS

5.4.1 - Análise da metodologia para quantificação da regularidade

Na figura 5.10 são apresentados os resultados encontrados para os parâmetros DPIP e DPIC em função da tensão média de soldagem, para as velocidades de alimentação do arame de 2.5, 4.0, 6.0 e 7.0 m/min. A tendência apresentada por estes parâmetros permite constatar a existência de um ponto de inflexão, a partir do qual valores crescentes ou decrescentes de tensão resultam em menor regularidade. A existência deste ponto indica que, para cada velocidade de alimentação do arame, existe apenas um ajuste de tensão capaz de produzir uma condição de regularidade máxima.

A correlação entre os parâmetros DPIP e DPTC e a qualidade do cordão depositado se mostrou coerente. Produzidos cordões de solda por deposição, encontrou-se correspondência entre a condição de maior regularidade e os cordões com melhor combinação de geometria e qualidade superficial. Fixada a velocidade de alimentação do arame, valores de tensão correspondentes a esquerda do ponto de inflexão resultaram em baixa quantidade de salpicos na superfície da peça obra. Entretanto, a geometria do cordão se mostrou desfavorável por apresentar grande convexidade. Para ajustes de tensão a direita do ponto de inflexão, embora tenha-se verificado uma melhora na geometria, os cordões passaram a apresentar má qualidade superficial. A presença de salpicos na superfície da peça assumiu proporções elevadas, sendo que as bordas do cordão apresentaram um aspecto disforme. Na figura 5.11 apresenta-se a correlação entre DPIP e as características do cordão depositado para velocidade de alimentação do arame de 4.0 m/min.

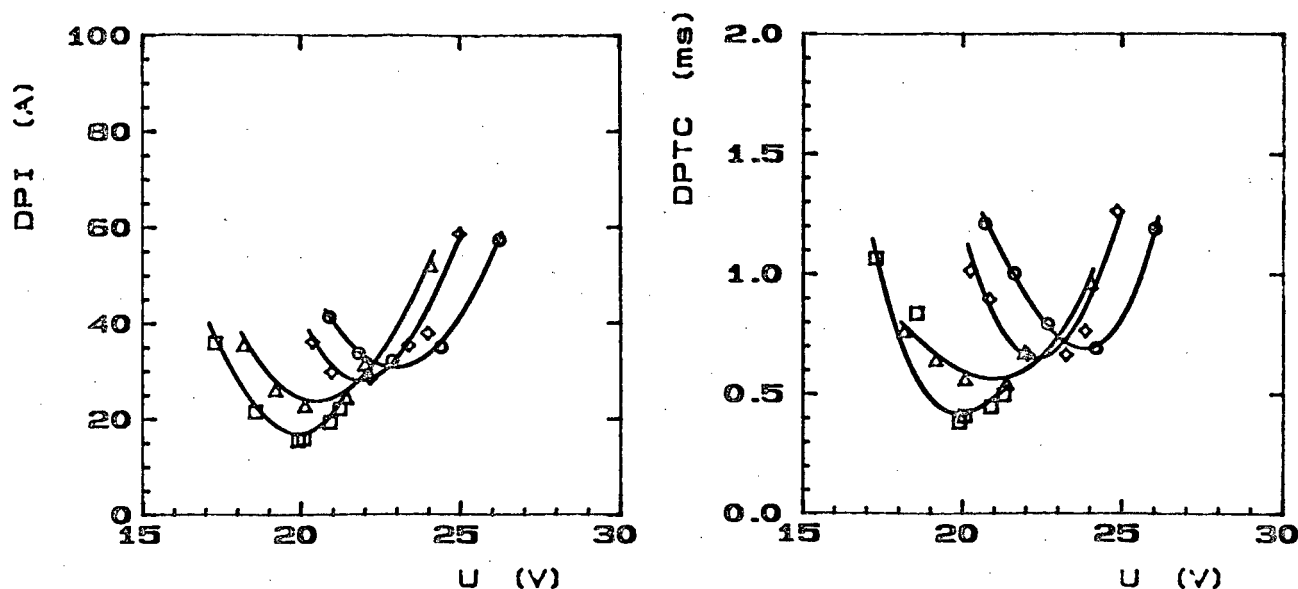
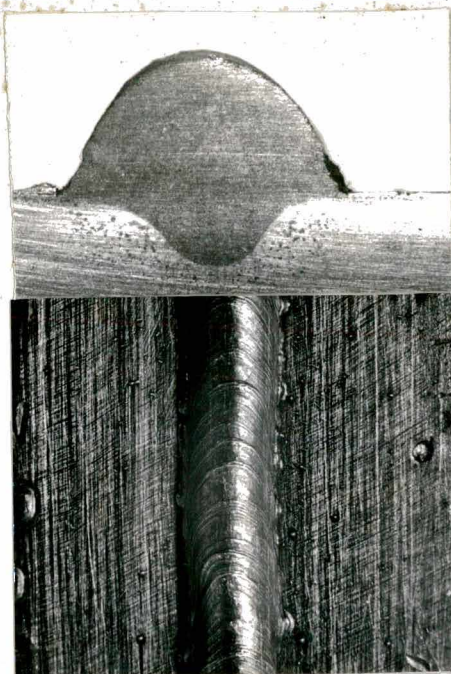


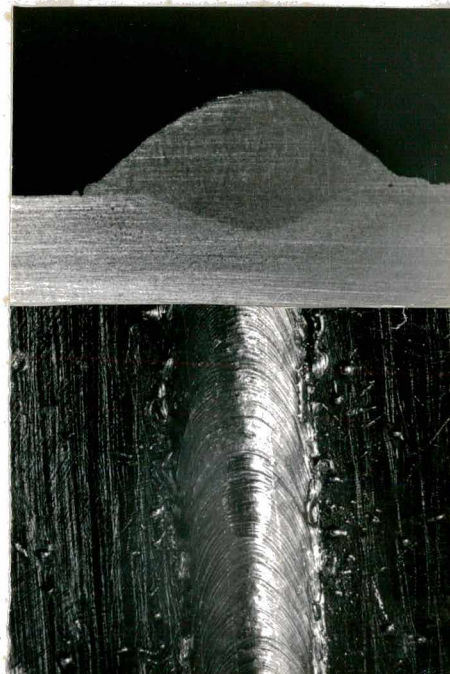
Figura 5.10 - Distribuição de a) DPI e b) DPTC em função da tensão média de soldagem (U).
 V_a (m/min): \square 2.5, \triangle 4, \diamond 6, \circ 7.

Apesar de existir para cada velocidade de alimentação do arame um valor de tensão que resulte em uma regularidade máxima, para valores de tensão muito próximos ao ponto de inflexão os parâmetros DPI e DPTC indicaram variações muito pequenas nas características da transferência. Diante deste comportamento, considera-se existir, de fato, uma faixa de valores de tensão que permitam manter a transferência dentro das condições de regularidade desejadas.

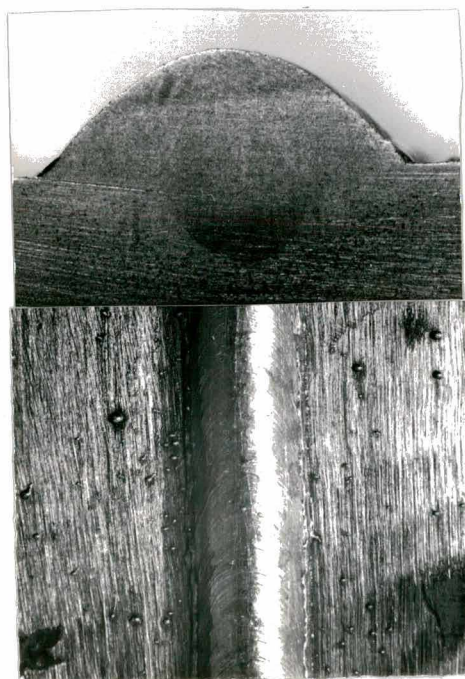
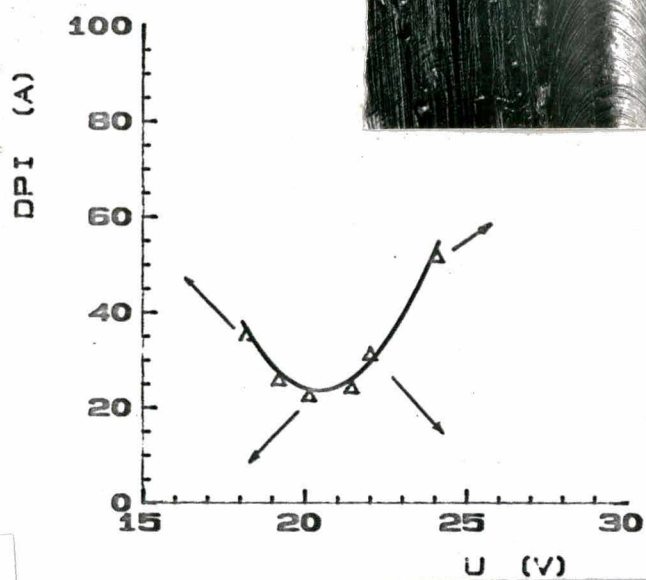
Embora os resultados obtidos para DPI tenham correspondido ao esperado, em função de apresentarem uma distribuição com ponto de mínimo bem definido, DPTC e DPTI apresentaram comportamento diferente dos resultados obtidos por Lucas [68]. Como apresentado na figura 5.10, nos ensaios realizados DPTC apresentou um comportamento semelhante ao encontrado para DPI. Entretanto, nos ensaios realizados por Lucas, DPTC apresentou uma distribuição diferente (fig. 5.12).



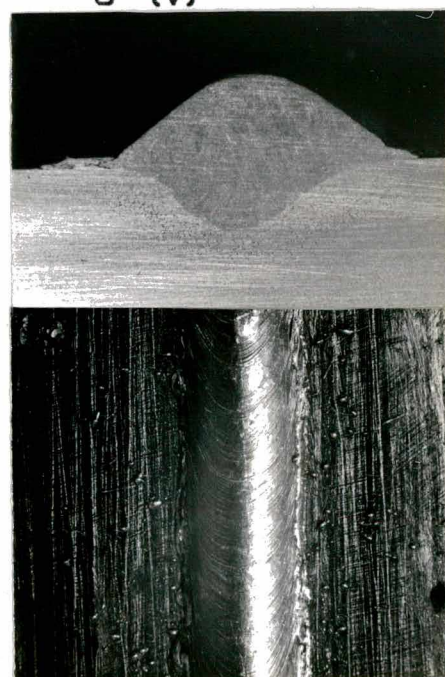
A



B



C



D

Figura 5.11 - Correlação entre DPIP e as características do cordão depositado (V_a : 4 m/min; v_s : 300 mm/s).

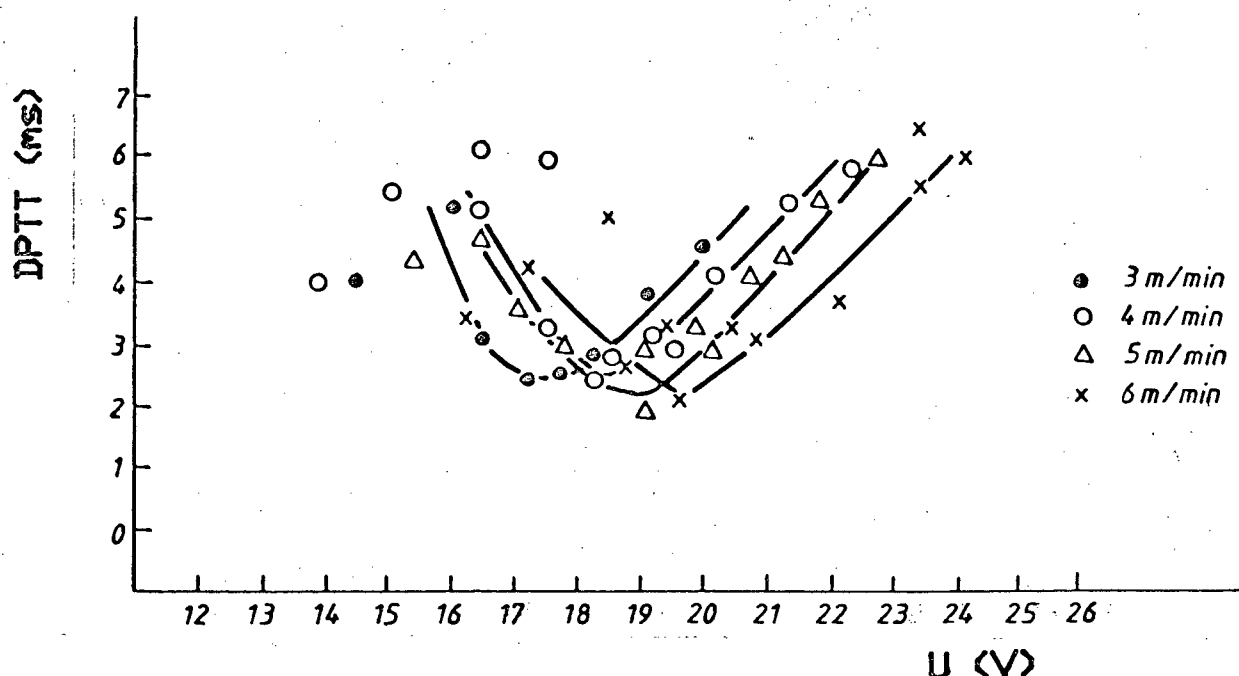


Figura 5.12 - Efeito da tensão média (U) na distribuição de DPTT. Resultados obtidos por Lucas [68].

Encontrou-se nova divergência de resultados para o parâmetro DPTT, em função da diferença de comportamento das curvas obtidas por Lucas (fig. 5.13) e aquelas obtidas nestes ensaios (fig. 5.14). Neste caso, inverteu-se a situação, e devido a isto, não se considerou DPTT como representativo da melhor combinação entre tensão e velocidade de alimentação do arame.

Julga-se apropriado neste ponto justificar a origem de não se haver considerado DPTT como parâmetro indicativo da melhor combinação entre tensão e velocidade de alimentação do arame. Ao ser desprezado, leva-se em consideração que esta metodologia de análise da transferência toma DPIP, DPTT e DPTC como entidades isoladas. Isto implica, obrigatoriamente, que o comportamento destes parâmetros em função da tensão de soldagem resulte em uma distribuição com ponto de inflexão bem definido. Sem apresentar este ponto, torna-se impraticável a utilização do parâmetro para

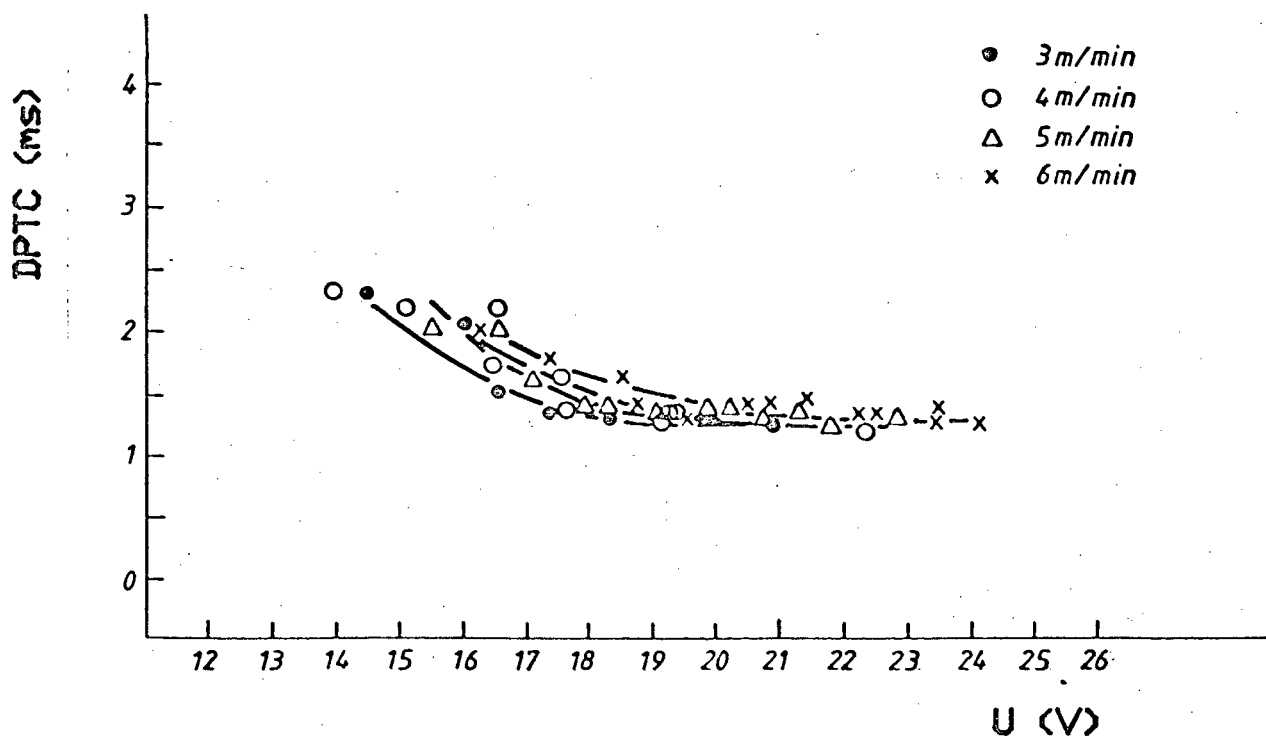


Figura 5.13 - Efeito da tensão média (U) na distribuição de DPTC. Resultados obtidos por Lucas [68].

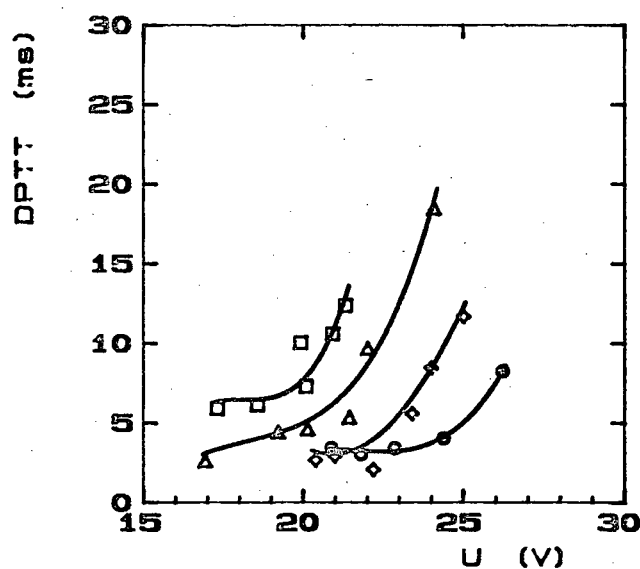


Figura 5.14 - Distribuição de DPTT em função da tensão média de soldagem (U). V_a (m/min): \square 2,5, \triangle 4, \diamond 6, \circ 7.

referenciar a condição de maior regularidade da transferência. Cabe observar, no entanto, que DPTT continua a ser representativo da regularidade da transferência. Encontra-se na literatura

referências à utilização deste parâmetro em métodos de análise estatística onde o índice de regularidade é definido pela combinação de um conjunto de um parâmetros, como em análise de regressão múltipla [69].

5.4.2 Resultados obtidos a partir da observação visual

Operando com uma velocidade de arame de 2.5 m/min e tensão média de soldagem de 18 V obteve-se um arco com comprimento de aproximadamente 1 mm, com o processo de transferência ocorrendo de forma regular. Elevando a tensão de soldagem para 20 V, obteve-se um aumento no comprimento do arco da ordem de 0.2 mm, sem que se observasse mudanças significativas nos parâmetros referentes a regularidade da transferência. Para valores de tensão da ordem de 23 V, a gota metálica passou a assumir posições não-axiais, tornando-se frequente o aparecimento de contatos entre a gota e a peça-obra sem que se observasse uma separação efetiva. Na figura 5.15 é apresentada a variação no diâmetro de gota calculado em função da tensão média de soldagem.

Realizados os ensaios para velocidades de alimentação do arame de 4.0 m/min obteve-se o mesmo comportamento encontrado para a velocidade de 2.5 m/min. Para a faixa entre 19 e 21 V, correspondendo a comprimentos médios de arco entre 1.0 e 1.2 mm, se obteve maior regularidade de transferência e cordões com melhores características de forma e qualidade superficial. Acima de 1.2 mm, correspondendo a tensões médias superiores a 22 V, a transferência passou a se caracterizar por gotas de tamanho irregular.

Para as velocidades de 6 e 7 m/min encontrou-se o mesmo comportamento observado em velocidades de 2.5 e 4.0 m/min. Para a

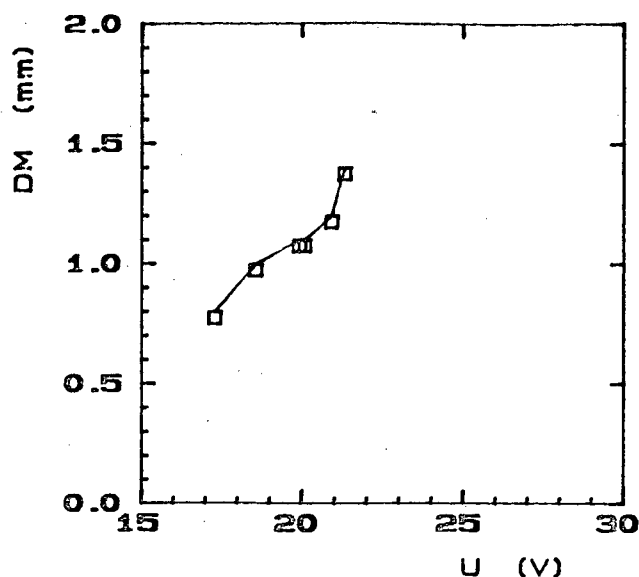


Figura 5.15 - Variação no diâmetro de gota calculado (DM) em função da tensão média de soldagem (U).
 V_a : 2.5 m/min.

faixa de valores de tensão que resultaram em comprimentos do arco entre 1.0 e 1.2 mm obteve-se a melhor condição de transferência, apesar desta ter se tornado mais irregular do que as obtidas com velocidades de arame mais baixas. Na figura 5.16 são apresentados a variação no diâmetro de gota calculado em função da tensão média de soldagem, para as velocidades de alimentação do arame de 4.0, 6.0 e 7.0 m/min.

Realizados os ensaios, o aspecto mais importante observado foi a incapacidade de obtenção de comprimento de arco superior a 1.2 mm, mantendo o processo exclusivamente na forma de curto-circuitos, sem a presença de transferência repulsiva. Tentativas de atuar na tensão ou velocidade de alimentação do arame, variáveis capazes de alterar o comprimento do arco, tornaram o processo de transferência instável. Propriamente, o que se observou foi a existência de uma faixa de valores permissíveis ao comprimento do arco de maneira a manter o processo dentro das

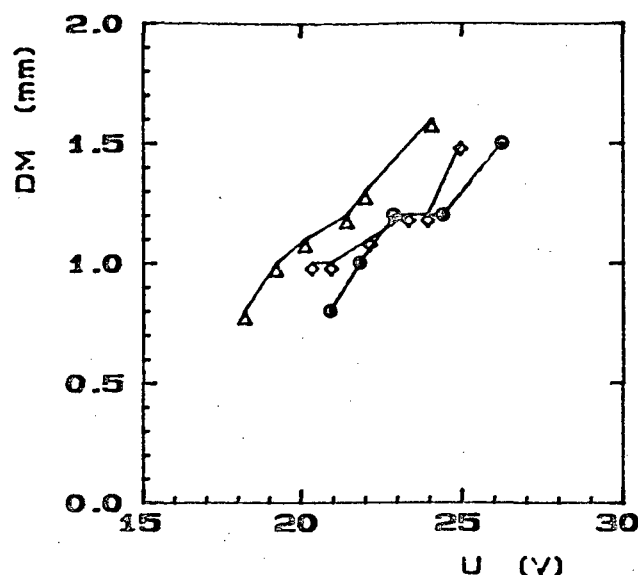


Figura 5.16 - Variação no diâmetro de gota calculado (DM) em função da tensão média de soldagem (U).
 V_a (m/min): Δ 4, \diamond 6 e \circ 7.

condições de regularidade e geometria desejadas. Para comprimentos do arco relativamente grandes, aproximadamente 2 mm, apesar da transferência se manter na forma de curto-circuitos, a gota passou a assumir posições não-axiais, caracterizando o início da transferência globular repulsiva. Em especial, para as velocidades de arame de 2.5 e 4.0 m/min, pôde-se observar o aparecimento frequente de contatos da gota com a peça-obra sem que se verificasse a ocorrência de transferência metálica. Nestas situações, o diâmetro de gota calculado deixou de manter sua correlação com o comprimento do arco. Como se tornaram frequentes o aparecimento de curto-circuitos sem a ocorrência da transferência metálica, o diâmetro calculado com base na frequência resultou em valores menores que a dimensão real do arco. Como exemplo, para uma combinação de tensão e velocidade de alimentação do arame de 25 V e 2.5 m/min, respectivamente, obteve-se diâmetro calculado de 1.5 mm, ao passo que o comprimento do arco medido foi de 2.5 mm. No sentido oposto, variações

decrecentes na tensão resultaram em arcos muito pequenos, acompanhados pela produção de uma quantidade elevada de salpicos muito finos. Para estes valores de tensão, encontrou-se dificuldade em definir o comprimento do arco com base na observação visual. Nestas situações, tornou-se significativa a oscilação no ponto de referência correspondente a extremidade sólida do eletrodo.

5.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Admite-se que ao se iniciarem ensaios envolvendo a determinação do comprimento do arco julgava-se possível a obtenção de valores maiores para esta grandeza até o aparecimento da transferência repulsiva. Contudo, os resultados obtidos demonstraram que o comprimento do arco comporta-se de uma forma diferente do esperado. Considerando o afastamento entre a linha de fusão e superfície da poça metálica como a dimensão mais característica do comprimento do arco, em transferência por curto-circuito esta dimensão se torna restrita a uma faixa de valores muito pequena, limitada pela combinação das variáveis tensão e velocidade de alimentação do arame que resulte em transferência regular.

Em comprimentos de arco muito pequenos, torna-se mais frequente a ocorrência de curto-circuitos antes que a extremidade fundida do eletrodo tenha atingido um estágio de desenvolvimento propício à transferência. Em virtude do pequeno espaço para o crescimento da gota, o tempo de arco, onde ocorre a fusão do eletrodo, torna-se muito pequeno. Ao ocorrer o contato com a poça de fusão, a extremidade fundida do eletrodo ainda pode se

apresentar em um estágio de fusão impróprio à transferência. Quanto mais prematuro o contato, maior o tempo para que o calor gerado por efeito Joule na ponte de ligação promova sua fusão, de maneira a torná-la suficientemente fluidica para que ocorra a constricção. Desta forma, a corrente de curto alcançará valores de pico maiores, dependendo do estágio de desenvolvimento da gota no instante do contato. Deve-se observar que esta maior rigidez da extremidade fundida do arame pode contribuir para a maior irregularidade da transferência. Uma vez que o arame mantém o seu avanço durante a fase de curto-circuito, pode ocorrer uma pressão da extremidade fundida do eletrodo sobre a poça de fusão. Como resultado, há um deslocamento continuado da posição relativa da linha de fusão e geração de uma perturbação excessiva do metal fundido na poça metálica. Nesta situação, a produção de salpicos tende a se dar na forma de pequenas fagulhas, oriundas da explosão da ponte de ligação (fig. 5.17). A produção de salpicos na forma

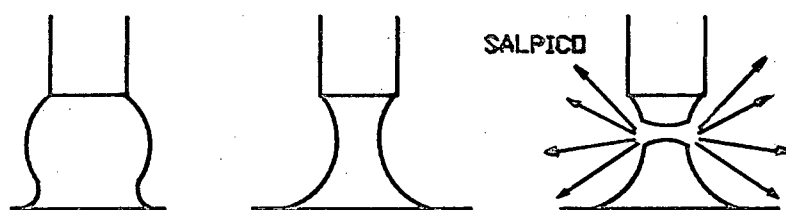


Figura 5.17 - Produção de salpicos finos como decorrência da explosão da ponte de ligação [48].

de gotas tende a ser reduzida, em virtude do eletrodo exercer uma pressão de contato entre a gota e a poça de fusão. A ocorrência deste mecanismo explicaria a origem de se haver encontrado nos cordões em que se ajustou baixos valores de tensão predominância de salpicos finos e muita irregularidade na dimensão do

comprimento do arco. Deve-se observar que a produção de salpicos finos e a ocorrência de "stubbing" podem estar associados à dimensão do arame, pois eletrodos de menor bitola estão mais sujeitos a produzir estes fenômenos [48]. Além da transferência se tornar irregular, o que possibilita uma maior produção de salpicos, o cordão de solda tende a apresentar maior convexidade e, por isto, sendo indesejável. No extremo oposto, comprimentos de arco grandes possibilitam igualmente o aparecimento de uma transferência irregular. Para o caso específico da transferência protegida por atmosfera rica em CO_2 ($\% > 25\%$), ao se permitir um comprimento de arco relativamente grande, as forças repulsivas passam a conduzir a gota em um movimento oscilatório. Torna-se frequente o aparecimento de gotas de tamanho irregular. Ao haver o curto-circuito, caso a área de contato seja pequena, a gota poderá ser ejetada para fora da poça de fusão. Esta situação tende a ocorrer quando a energia de tensão superficial, dependente da área de contato entre a gota e a poça metálica, torna-se numericamente inferior a energia do campo magnético [70]. Esta energia do campo surge a partir do aparecimento de uma densidade de corrente convergente sobre o ponto de ligação entre a gota e a poça de fusão (fig. 5.18). Desta forma, gotas com raio de curvatura

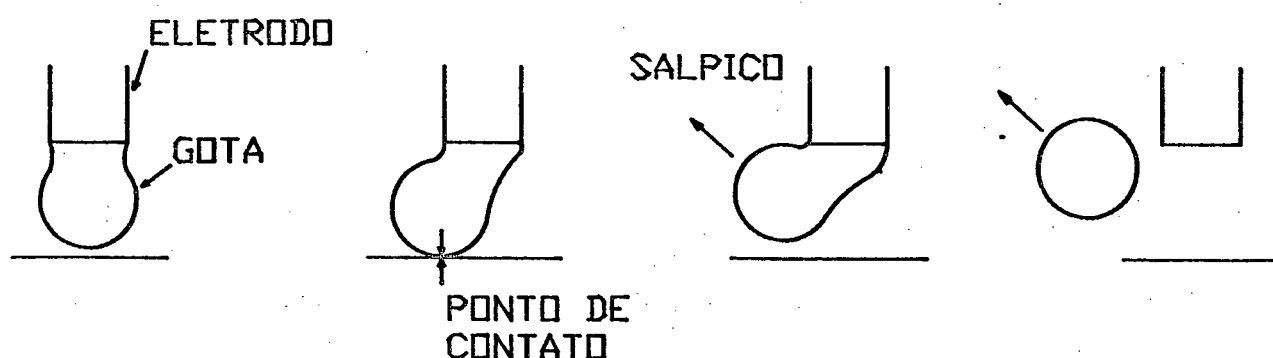


Figura 5.17 - Aparecimento da força eletromagnética contrária à separação em função de uma densidade de corrente convergente [48,70].

muito pequeno tendem ao não coalescimento no instante do curto, em razão da pequena área de contato. O resultado é o aparecimento de grandes variações nos picos de corrente de curto e na produção excessiva de salpicos de grandes dimensões, em função de serem formados por gotas não coalescidas. Deve-se observar que a produção de salpicos por não coalescimento pode se aplicar igualmente a comprimentos de arco pequenos, bastando para isto que surjam as condições propícias para sua evolução.

Deve-se observar que a corrente de soldagem pode exercer grande influência sobre este mecanismo. Tomando por base seu valor médio, correntes crescentes promovem um aumento no nível de perturbação sobre a superfície da poça de fusão [34] e, acima de 200 A, o rompimento da ponte de ligação ao menor contato da gota com a poça metálica [49]. A produção de salpicos é favorecida, visto a potência de reignição do arco assumir proporções mais elevadas. Da mesma forma, correntes mais elevadas tendem a aumentar a energia do campo magnético, possibilitando um aumento na incidência de gotas não coalescidas.

Da mesma forma que a regularidade, a geometria do cordão também é influenciada pelo tamanho das gotas metálicas. Essers *et al* [70,71] desenvolveram um estudo sobre a transferência de calor e penetração nos cordões de solda produzidos com o processo MIG/MAG. Estes autores verificaram que a maior parcela de calor dispendida na fusão da peça-obra provem da energia térmica contida nas gotas metálicas. Diante destes resultados, gotas com maior volume e, portanto, com maior diâmetro, possuem maior quantidade de calor, permitindo uma maior molhabilidade do cordão depositado. O termo molhabilidade se refere a característica do cordão depositado de possuir menor viscosidade, permitindo um maior escoamento do metal fundido. Apesar de seu caráter secundário, a

parcela de calor gerada por efeito joule dos pontos catódicos aumenta em função do maior período de arco, permitindo que a temperatura do metal líquido atinja níveis mais elevados. Deve-se observar que vários outros parâmetros podem atuar de forma conjunta na definição da geometria do cordão. Contudo, fixadas as variáveis de soldagem, para uma mesma velocidade de alimentação do arame, tensões decrescentes resultam em cordões de maior convexidade. Apesar da geometria do cordão e regularidade da transferência se constituírem em manifestações distintas da física do processo de soldagem, ambas se relacionam com as dimensões da gota metálica e portanto, com o afastamento que se convencionou como comprimento do arco voltaico.

Em transferência por projétil, onde o arco pode assumir comprimentos da ordem de 5 a 10 mm, ou até mais, a existência de perturbações não induzem à variações no comprimento do arco que permitam afetar o mecanismo de separação. Como o afastamento entre os eletrodos é normalmente grande, pequenas perturbações não provocam mudanças na regularidade da transferência. Em curto-circuito, o comportamento é diferente. Neste modo de transferência há necessidade do comprimento do arco ser pequeno, de maneira a permitir que as gotas metálicas sejam transferidas por meio de contato físico entre estas e a poça de fusão. Por haver necessidade desta proximidade entre os eletrodos, o mecanismo de separação se torna mais suscetível a qualquer perturbação que venha a alterar o comprimento do arco. Variações da ordem de 0.2 mm já são suficientes para promover um contato físico da gota com a poça, alterando significativamente a regularidade da transferência. Desta forma, caso não haja uma perfeita combinação entre tensão e velocidade de alimentação do arame, de maneira a resultar em um comprimento de arco ótimo, o

processo de transferência estará sujeito a irregularidades

Ao se analisar o comportamento da grandeza comprimento do arco, torna-se necessário fazer alguns comentários sobre o valor numérico do comprimento de arco ótimo. Como a transferência por curto circuito se processa em função do contato entre o eletrodo e a poça de fusão, a existência de qualquer perturbação poderá resultar em variações no comprimento do arco e, por conseguinte, no tamanho da gota metálica transferida. Além deste aspecto, a metodologia de medição utilizada não permite que se possa expressar a medida do comprimento do arco de forma a não deixar margem de dúvida quanto aos valores assumidos pela grandeza. Como citado anteriormente, o sistema de medição utilizado não permitiu a aquisição dos valores instantâneos do comprimento do arco. Apesar da própria grandeza ser passível de grande variação e de se ter contado com informações adicionais quanto ao diâmetro da gota transferida, diante das limitações do sistema, o comprimento do arco medido deve ser interpretado como um valor de referência. Diante destes aspectos, ao se expressar que o comprimento de arco que resulta em maior regularidade compreende a faixa entre 1.0 e 1.2 mm se está referindo a valores médios. Considera-se, de fato, a existência de um tamanho de gota médio que minimiza o aparecimento de irregularidades na transferência. Este diâmetro de gota, definido em função do comprimento do arco, corresponde a uma dimensão que permite, dentro do caráter aleatório da transferência por curto-circuito, maior regularidade de destacamento. Além deste aspecto, esta faixa de valores ótimos se refere as condições em que se realizaram os ensaios. Mudanças no diâmetro do eletrodo ou velocidade de resposta da fonte, entre outros, podem alterar estes comprimentos ótimos. Para o caso específico da velocidade de resposta da fonte, alterações na indutância do circuito resulta em

variações nos valores instantâneos da corrente de arco e, a partir desta, nas dimensões da gota transferida (seção 5.6).

Diante dos resultados, considera-se que em transferência por curto-circuito, torna-se preferível a substituição das curvas características estáticas por uma relação definida com base na regularidade da transferência. Uma vez que a regularidade está associada ao comprimento do arco, esta pode ser tomada como parâmetro de referência para a determinação de relações paramétricas envolvendo tensão e corrente de soldagem. Agindo desta forma, a medição do comprimento do arco pode ser dispensada, uma vez que esta envolve um elevado grau de dificuldade de execução em função do caráter dinâmico da grandeza e de sua faixa de variação extremamente pequena. Além deste aspecto, caso não se leve em consideração a regularidade da transferência, poderão ser levantadas relações paramétricas entre tensão e corrente de soldagem que resultem em transferência instável. Este tipo de transferência deve ser evitado sob pena de obtenção de um cordão de má qualidade e forte produção de salpicos. De fato, a limitação da análise do comprimento do arco à transferência mais regular não surge de uma limitação física dos mecanismos de separação, mas pelo fato da transferência irregular ser prejudicial a produtividade do processo. Para o caso específico das condições em que se realizaram os ensaios, poderia-se determinar relações envolvendo tensão e corrente de soldagem para comprimentos do arco superiores a 1.2 mm. Contudo, a transferência metálica se processaria de forma completamente instável. Mesmo com o processo de separação transcorrendo no modo globular, onde se tornaria possível obter comprimentos de arco da ordem de 5 mm ou mais, manteria-se o caráter de instabilidade do processo.

Considera-se fundamental que se faça uma distinção de nomenclatura para designação de curvas características estáticas e faixa operacional, uma vez que estas duas relações designam comportamentos distintos do processo. A denominação curva característica estática se aplica com maior propriedade à transferência por projétil, onde o comprimento do arco pode assumir dimensões variadas e ser mantido nestas em um valor efetivamente constante. Para a determinação destas curvas, as variações no comprimento do arco decorrentes da separação da gota metálica podem ser desprezadas. Por sua vez, considera-se que a denominação faixa operacional se aplica a transferência por curto-circuito, diferindo da curva característica estática por desconsiderar em sua determinação o comprimento do arco voltaico. Para estas relações, assume maior grau de importância a seleção de métodos que permitam especificar ou quantificar a regularidade do processo de transferência.

Com base nas combinações entre tensão e velocidade de alimentação do arame que resultaram em maior regularidade, definiu-se a relação entre tensão e corrente, aplicada as condições de ensaio (fig. 5.19). Igualmente se obteve a relação entre corrente média de soldagem e velocidade de alimentação do arame (fig. 5.20). Estas relações são extremamente importantes para a determinação de oscilogramas de velocidade de fusão e corrente de soldagem [8].

O fato de se haver utilizado atmosfera de proteção composta por uma mistura de 75% de argônio e 25% de CO_2 não altera a essência do comportamento encontrado. Em atmosferas de argônio puro ou com baixos teores de CO_2 ou O_2 , não se verifica o aparecimento de transferência repulsiva, pois não há condições para o surgimento de forças de contra-separação. Isto implica que,

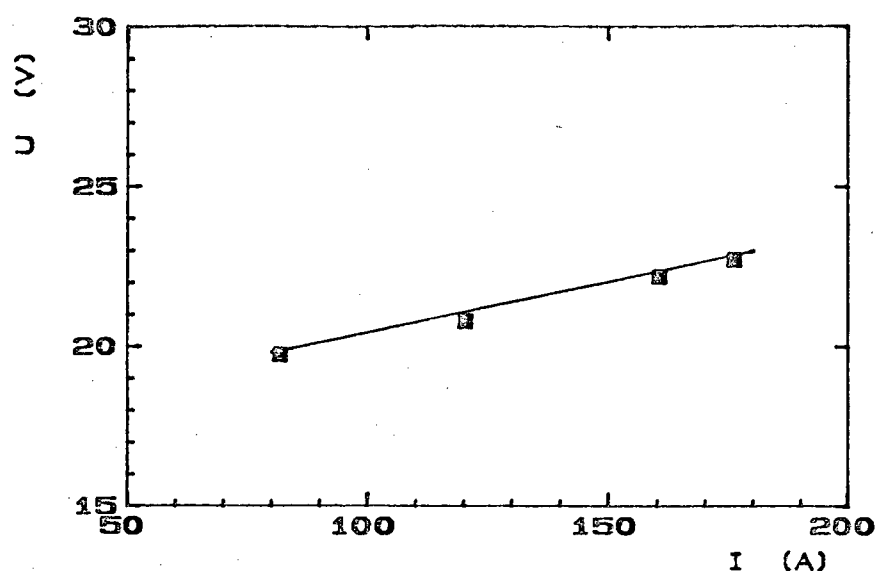


Figura 5.19 - Faixa operacional de soldagem para as condições em que se realizaram os ensaios ($U = 0.031 I + 17.2$).

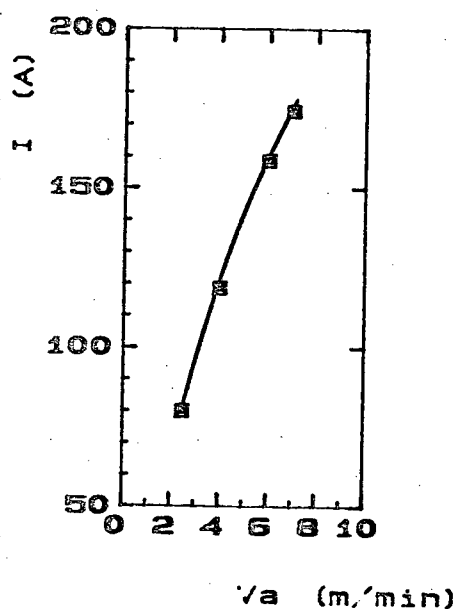


Figura 5.20 - Relação entre velocidade de alimentação do arame e corrente para as condições de ensaio.

mesmo com a elevação da tensão de soldagem, a gota tende a manter sua posição axial durante suas fases de crescimento e separação. Entretanto, da mesma forma que em transferência protegida por C25, comprimentos de arco pequenos propiciam o aparecimento de contatos prematuros da gota com a poça de fusão e a formação de cordões de grande convexidade. No extremo oposto, gotas de tamanho grande

resultam em picos de corrente de curto elevados e grande potência de reignição. Apesar da atmosfera de argônio permitir que a transferência se dê com maior regularidade, os princípios básicos que conduzem à instabilidade e má formação do cordão se mantêm inalterados.

5.6 COMPORTAMENTO DOS PARÂMETROS DPIP e DPTC DIANTE DA ALTERAÇÃO NA DINÂMICA DA FONTE DE ENERGIA

Diante das potencialidades da metodologia para quantificação da regularidade da transferência, decidiu-se verificar o comportamento dos parâmetros diante de alterações na velocidade de resposta da fonte de energia.

Utilizando-se o mesmo procedimento descrito anteriormente, verificou-se o comportamento do processo impondo uma redução na velocidade de resposta dinâmica da fonte (dI/dt 60 KA/s para 47 e 27 KA/s) mantendo a velocidade de alimentação do arame em 4.0 m/min.

Sob condições de respostas dinâmicas variadas, ao se impor uma redução na taxa de crescimento da corrente, o processo tornou-se mais suscetível ao aparecimento de curto-circuitos de pequena duração (fig. 5.21), levando DP(TMC) a apresentar um crescimento da ordem de 100 a 200% (fig. 5.22). Com base unicamente nos valores encontrados para este parâmetro (fig. 5.23), a diminuição na resposta dinâmica da fonte promoveu uma redução na regularidade da transferência. Contudo, apesar deste aumento em DPTC, a qualidade do cordão depositado se manteve praticamente inalterada. De fato, verificou-se, inclusive, uma redução na produção de salpicos na faixa de tensão correspondente

à transferência por curto-circuito mais regular. Na figura 5.24 são apresentadas macrografias de corpos de prova obtidos durante os ensaios. Em ambos os casos, a mudança na dinâmica da fonte não alterou a qualidade superficial do cordão.

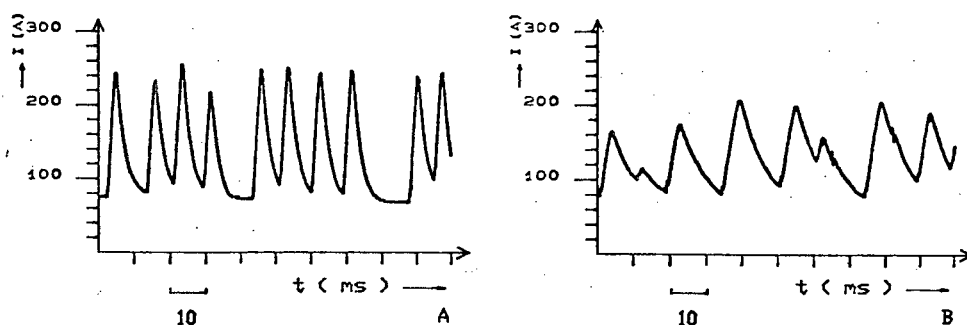


Figura 5.21 - Oscilogramas típicos de corrente.
 dI/dt (KA/s): a) 47 e b) 60.

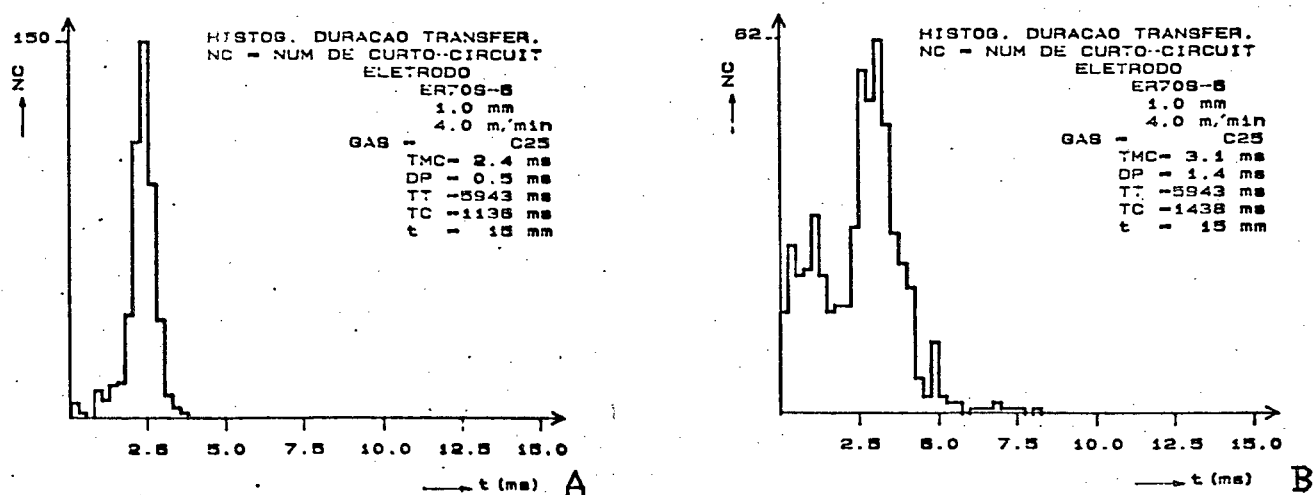


Figura 5.22 - Histogramas típicos de tempo de curto.
 dI/dt (KA/s): a) 47 e b) 60.

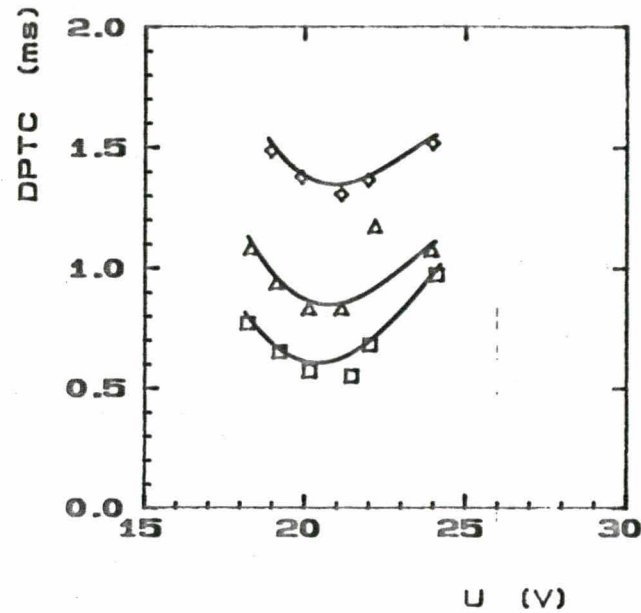


Figura 5.23 - Distribuição de DPTC em função da tensão média de soldagem (U). dI/dt (KA/s): a) □ 60; b) Δ 47 ; c) ◇ 27.

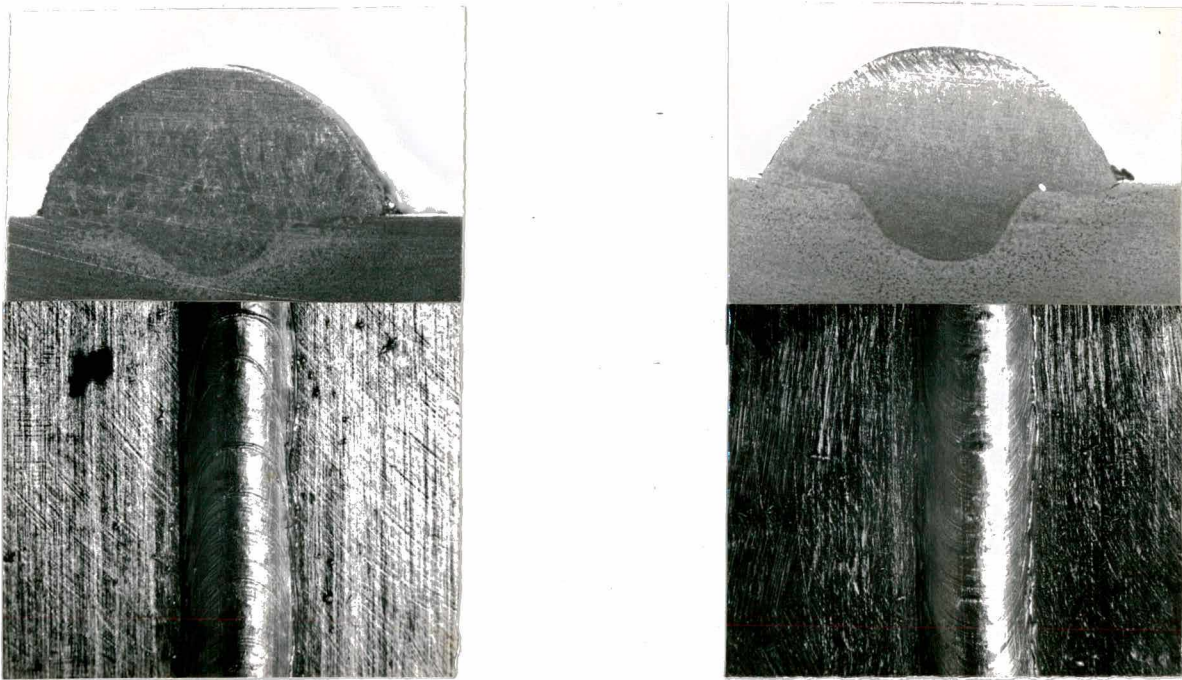


Figura 5.24 - Aspecto do cordão depositado. V_a : 4 m/min; dI/dt : 27 KA/s; a) 18 V b) 22 V

Apesar da alteração na dinâmica da fonte ter provocado uma redução nos valores da corrente de pico não se detectou variações significativas em DPIP na faixa mais regular de transferência por curto-circuito (fig. 5.25). Este comportamento corrobora com os resultados obtidos nos corpos de prova, onde a qualidade

superficial dos cordões se manteve mesmo com a mudança imposta à resposta dinâmica da fonte.

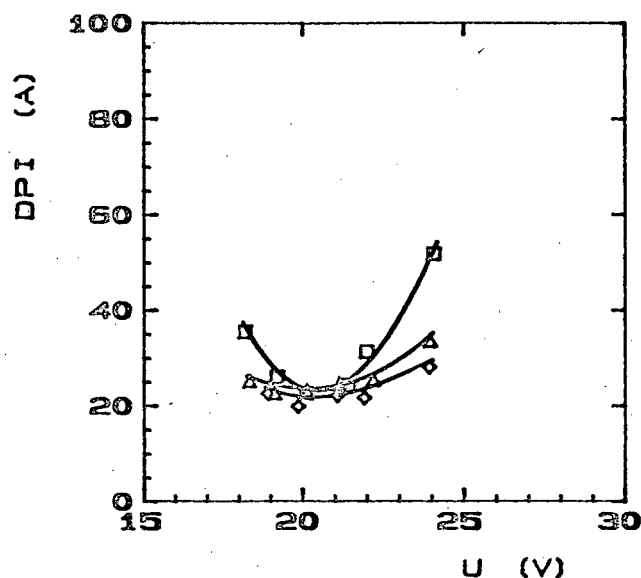


Figura 5.25 - Distribuição de DPI em função da tensão média de soldagem. dI/dt (KA/s): a) $\square 60$; b) $\triangle 47$; c) $\diamond 27$.

O comportamento expresso por DPIC reflete uma condição natural do aumento da indutância. Com o lento decaimento da corrente no período de arco, aumenta a possibilidade de curto-circuitos ineficientes. Além da ação do arco sobre a poça ser maior, a energia do campo magnético no instante do curto-circuito tende a suplantar a energia de tensão superficial em função da corrente estar em níveis mais altos.

Com relação aos três fatores selecionados, os resultados permitem afirmar que DPIP corresponde ao parâmetro de maior aplicabilidade visto a correlação obtida entre os valores numéricos e a qualidade resultante do cordão. Esta correlação se manteve em todas as modalidades de ensaio realizadas, incluindo os ensaios com o processo MAGCI (capítulo 6).

Concluiu-se que o aumento da irregularidade de transferência indicado por DPTC não influi sobre a qualidade do cordão depositado. Apesar dos ensaios se limitarem a três valores de resposta dinâmica da fonte, acredita-se que DPIC não seja um parâmetro válido para comparar a regularidade sob regulagens de indutância variadas. O fator presta-se à determinação da faixa operacional sob qualquer condição de indutância. Entretanto, não se aplica à comparação da regularidade entre valores de indutância distintos.

No aspecto geral, o método se mostrou eficiente para determinação da faixa operacional de transferência por curto-circuito. Deve-se observar que sua utilização não dispensa a adoção de um critério suplementar de aceitação que pode ser a qualidade do cordão de solda.

Diante destes resultados, considerou-se como válidos os parâmetros de estabilidade encontrados, assim como a metodologia de cálculo adotada para sua determinação. O fato de DPTT não haver sido considerado como representativo da condição de maior regularidade, não interfere na eficiência do método. Admite-se não haver sido encontrado uma justificativa conclusiva para explicar o fato de DPTT não apresentar comportamento semelhante aos demais parâmetros.

Um aspecto que merece ser comentado refere-se ao fato da melhor combinação entre tensão de referência e velocidade de alimentação do arame ter se mantido inalterada com a mudança na velocidade de resposta da fonte. Este comportamento fornece indícios de que, para um processo de transferência ocorrendo de forma regular, a alteração na dinâmica da fonte não interfere na combinação entre tensão e velocidade de alimentação do arame que define a faixa operacional. Deve-se observar que este

comportamento não implica necessariamente em manutenção das características do cordão depositado, uma vez que é clara a mudança nos valores instantâneos da corrente de soldagem durante as fases de arco e de curto-circuito. Além deste aspecto, somente com base nos resultados obtidos sob uma condição de velocidade de alimentação do arame se tem uma base de informação muito pequena para extrapolar um comportamento para todas as faixas permissíveis de velocidades de arame e de resposta da fonte permissíveis à transferência por curto-circuito. Contudo, caso se verifique sua validade, uma vez conhecida a faixa operacional para uma dada velocidade de resposta da fonte, esta se manterá sob imposição de mudanças na dinâmica da fonte.

6 PROCESSO MAG COM DUPLO FLUXO

O processo com duplo fluxo (MAGDF) consiste em uma variação do processo de soldagem MIG/MAG, caracterizando-se pela forma construtiva do bocal que permite injetar na região do arco voltaico atmosferas de argônio e CO_2 de forma separada em lugar de uma atmosfera única composta pela mistura destes gases (fig. 6.1). Seu desenvolvimento se fundamenta [73] no fato da gota e o modo de transferência metálica serem determinados pelas condições de formação da interface entre o arco voltaico e a extremidade do eletrodo.

Como descrito no capítulo 2, em atmosfera de argônio (% >80) a interface anódica abrange, praticamente, todo o hemisfério inferior do eletrodo criando condições para que a força eletromagnética atinja magnitude suficiente para propiciar a transferência por projétil. Para ajustes de parâmetros e variáveis de soldagem que resultem em transferência por curto-circuito, a produção de salpicos reduz-se a níveis inferiores àqueles encontrados em atmosfera rica em CO_2 (% >25).

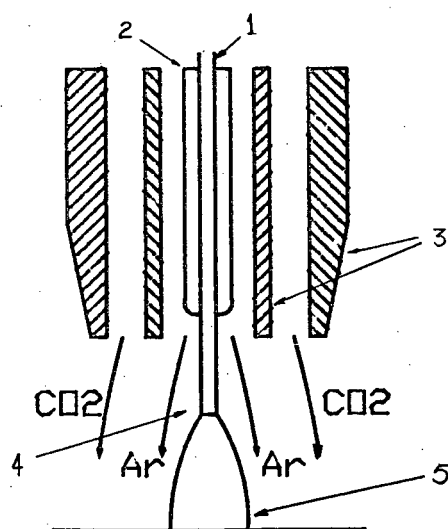


Figura 6.1 - Diagrama esquemático do processo MAGDF [73]:
1 - eletrodo; 2 - tubo de contato; 3 - bocais;
4 - ambiente composto por argônio; 5 - arco.

A utilização de dióxido de carbono puro como gás de proteção resulta em um comportamento distinto. Por ser um gás ativo e com maior condutividade térmica, há redução na área de interface anódica, possibilitando, em conjunto com a natureza oxidante da atmosfera, o aparecimento de forças de contra-separação. Comparativamente à soldagem com argônio, a utilização de CO_2 conduz a uma maior irregularidade na transferência e produção de salpicos. No metal depositado, a presença de oxigênio atômico em teores superiores a 400 PPM [75] prejudica a tenacidade dos cordões de solda. Apesar de introduzir aspectos negativos ao processo de soldagem, a utilização de CO_2 permite produzir cordões com maior penetração e largura, além de uma maior resistência a porosidade [73]. Caso seja imperativo promover a desoxidação do cordão, esta pode ser obtida pela seleção adequada do arame de adição. Arames contendo silício, manganês, entre outros, propiciam a redução do oxigênio na forma atômica [75].

O processo com duplo fluxo procura combinar as vantagens advindas do uso de argônio e CO_2 . A atmosfera interna, composta por argônio, envolve completamente a extremidade do eletrodo, permitindo que haja transferência por projétil, ou por curto-circuito sem transferência repulsiva. O fluxo externo, composto por CO_2 , cumpre as funções de proteger a região de soldagem e atuar na poça metálica, melhorando com isto a qualidade superficial da solda.

A possibilidade de compor a atmosfera protetora com variadas proporções entre argônio e dióxido de carbono amplia as alternativas de análise deste processo de soldagem. Para garantir que a transferência transcorra com um mínimo de

estabilidade, a proporção de argônio na mistura não deve ser inferior a 25% [73,74] (fig. 6.2). Deve-se observar que durante a soldagem podem vir a ocorrer alterações na proporção de argônio provocadas pela presença de salpicos no bocal, afetando, com isto, as características da transferência. Sob o aspecto referente a produção de salpicos, Masumoto *et al* [13] verificaram que sua ocorrência no processo por duplo fluxo é inferior a obtida no processo MAG com arco de CO_2 , e equivalente ou inferior ao processo MAG com atmosfera composta por uma mistura de 80% Ar/20% CO_2 (fig.6.3).

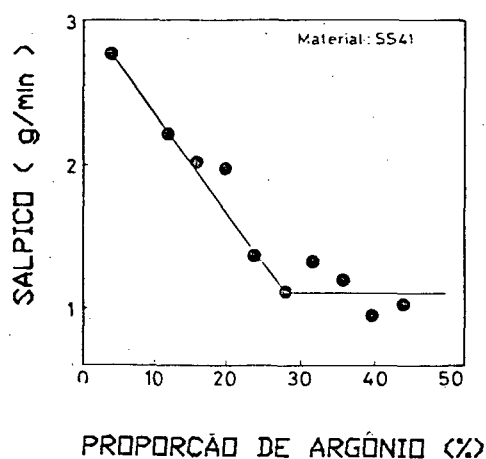


Figura 6.2 - Efeito da proporção de argônio na produção de salpicos (I: 300-320 A; V: 32 V; vazão de gás: 25 l/min) [74].

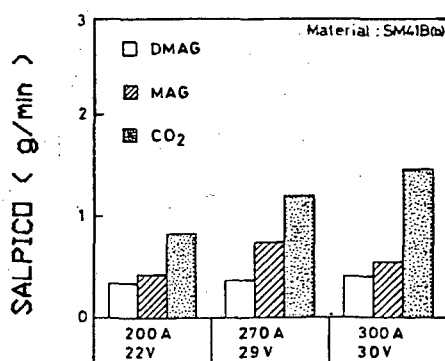


Figura 6.3 - Produção de salpicos nos processos MAGDF (MAGCI), MAG e CO_2 [74].

6.1 CONSTRUÇÃO DO BOCAL

Para realização dos ensaios com processo por duplo fluxo se projetou e construiu um bocal adaptável à pistola de soldagem utilizada no SISDATASOLDA. O esquema de montagem deste bocal é apresentado na figura 6.4.

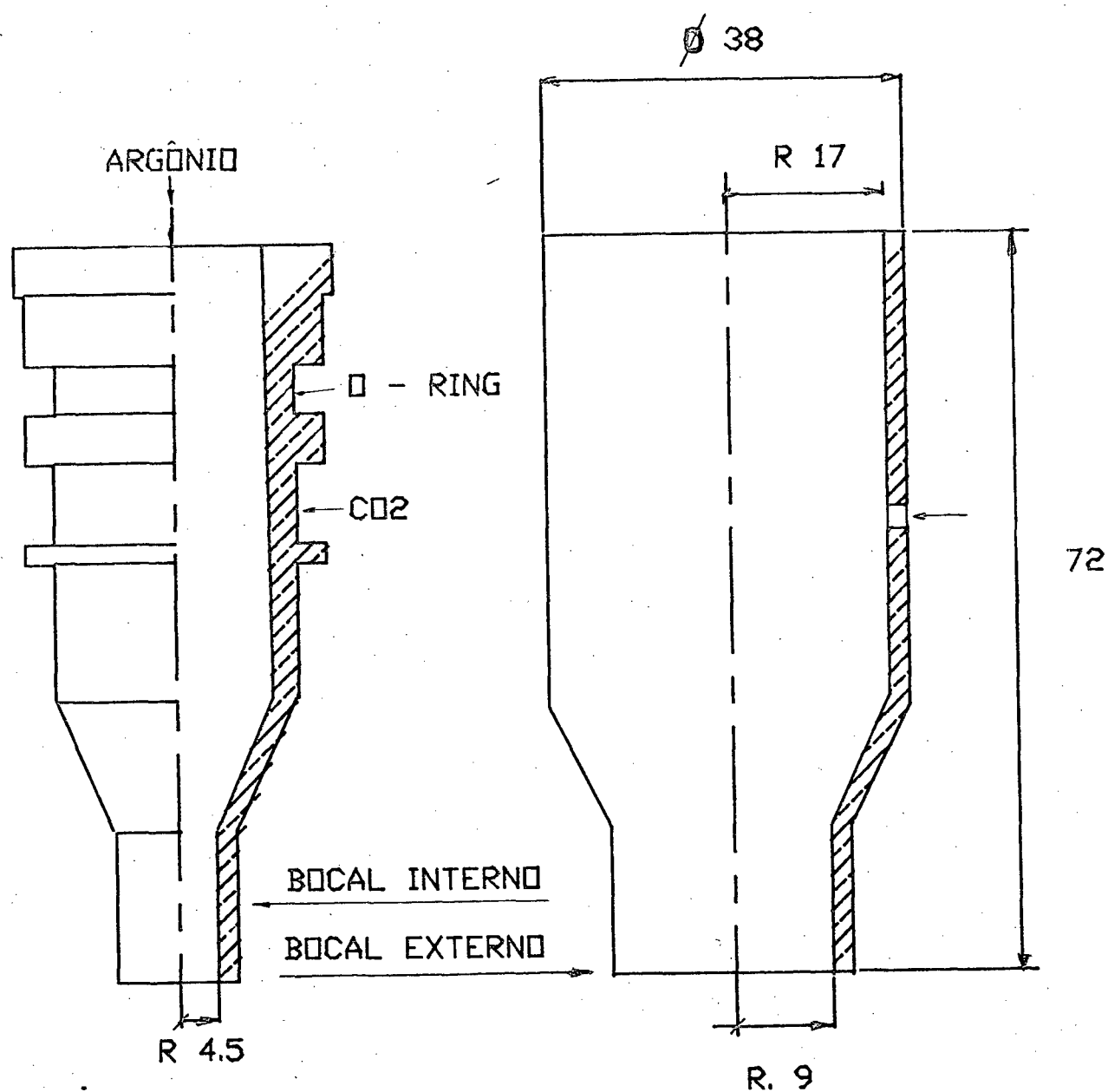


Figura 6.4 - Esquema do bocal com duplo fluxo.

Em virtude da atmosfera de proteção ser composta por dois gases, o dimensionamento do bocal para o processo MAGDF assume importância maior em relação ao dimensionamento de bocais convencionais. Diâmetros muito pequenos não possibilitam uma proteção adequada do arco voltaico e transferência metálica, ao passo que diâmetros grandes podem resultar em proteção composta exclusivamente por argônio, tornando inexpressiva a influência do dióxido de carbono. Para evitar este tipo de problema, dimensionou-se os bocais interno e externo com valores obtidos a partir da referência bibliográfica [73].

O fato do bocal com duplo fluxo visar apenas a realização de ensaios experimentais dispensou a necessidade de introduzir um sistema de refrigeração. Porém, por motivo de segurança, dimensionou-se as paredes com espessura de 2 mm para evitar o aparecimento de deformações por aquecimento. A utilização de cobre para confecção deste elemento se deu em função da grande capacidade de dissipação térmica existente neste material.

6.2 VERIFICAÇÃO DO EFEITO DE CONSTRIÇÃO

Ao ser definido este objetivo, procurou-se verificar, por meio de registros fotográficos, a existência de um efeito de constrição do arco induzido pela presença de CO_2 como fluxo externo. A obtenção de informações desta natureza permitiriam analisar a influência exercida pelo gás CO_2 sobre a distribuição espacial do arco voltaico.

Para a execução destes ensaios, optou-se pela utilização do processo de soldagem TIG. Esta opção se deu pela natureza mais estável deste arco, visto que:

- Não há transferência metálica;
- Possibilidade de manutenção do comprimento de arco constante por longos períodos de tempo;
- Possibilidade de uso de peça-obra fixa, dispensando o movimento relativo entre pistola e peça-obra;
- Maior estabilidade espacial do arco.

Embora tenha-se chegado a realizar registros fotográficos para verificar o efeito de constricção, consirera-se prematuro fazer qualquer afirmação sobre a existência de tal efeito, uma vez que não se pode garantir que as dimensões da imagem correspondam as reais dimensões do arco voltaico (item 4.4). Torna-se fundamental conhecer os erros advindos da determinação da distribuição espacial do arco voltaico com base em registros fotográficos, uma vez que o efeito constricção pode atingir proporções muito pequenas. Como o gás argônio-forma o ambiente que protege o eletrodo, o efeito de constricção tende a se originar exclusivamente pela condutividade térmica do CO_2 , não existindo o mecanismo induzido pela presença de sub-óxidos na superfície do eletrodo (cap. 2). Esta possibilidade é bem real pois nos ensaios realizados não foi observada contaminação do eletrodo. Este fato demonstra que a atmosfera em contato com o eletrodo compôs-se predominantemente por argônio. Entretanto, a presença de CO_2 nesta região não esta descartada visto os resultados apresentados em [73] onde verificou-se a presença de CO_2 no ambiente composto por argônio. Contudo, caso tenha ocorrido uma mistura de CO_2 ao gás argônio, esta foi em proporções mínimas a ponto de não levar à contaminação do eletrodo.

6.3 VERIFICAÇÃO DA REGULARIDADE DA TRANSFERÊNCIA

Estes ensaios se destinaram a comparar a regularidade da transferência e geometria do cordão entre o processo MAG protegido com duplo fluxo (MAGDF) e proteção composta por mistura gasosa (MAG/C25). Na tabela 6.1 são apresentadas as condições de execução dos ensaios.

GÁS DE PROTEÇÃO	
	MAGDF
	9 1 AR/ 3 1 CO ₂
	MAG/C25
	12 1
ALTURA DE TOMADA DE CORRENTE	15 mm
DIÂMETRO DO ELETRODO	1.0
VELOCIDADE DE SOLDAGEM	300mm/s
EFEITO INDUTIVO	60 kA/s
MODULAÇÃO DA FONTE	TENSAO CONSTANTE

Tabela 6.1 - Condições de realização dos ensaios

Uma vez que nos dois processos o ambiente onde se forma o arco compõe-se por gases que impõem características diferentes à transferência metálica, é de se supor que a tensão que resulte em maior regularidade de transferência não se mantenha constante em ambos os processos. Desta forma, buscou-se em cada situação definir o valor mais adequado de tensão utilizando, para tanto, os procedimentos descritos no capítulo 5.

Decidiu-se adotar como variável de análise a corrente média de soldagem (tabela 6.2) em função de ensaios preliminares haverem indicado existir comportamento diferenciado na relação

velocidade de alimentação do arame X corrente para os processos MAGDF e MAG/C25. Estipulou-se o valor de corrente 80 A em função da disponibilidade de resultados obtidos para o processo MAG/C25 (cap. 5). Ao se fixar este valor de corrente, tornou-se necessário adequar a velocidade de alimentação do arame no processo MAGDF de maneira a ser atingido o valor de corrente fixado.

Em uma segunda etapa realizaram-se ensaios onde se fixou como variável de análise a velocidade de alimentação do arame (tabela 6.2). Para a velocidade de 4,0 m/min encontrou-se uma diferença na corrente média de soldagem de aproximadamente 10A (MAGDF 110 A / MAG/C25 120A).

VARIÁVEL DE ANÁLISE	MAGDF	MAG/C25
CORRENTE MÉDIA (80 A)	Va: 2.8m/min	Va: 2.5 m/min
VELOCIDADE DE ALIMENTAÇÃO DO ARAME (4 m/min)	Im: 110 A	Im: 120 A

Tabela 6.2 - Variáveis de análise selecionadas

Acredita-se que a origem do comportamento encontrado para a relação entre velocidade do arame X corrente esteja relacionada a uma diferença nas dimensões dos bocais utilizados, o que acabou por provocar alterações na dimensão da extensão de eletrodo. Embora tenha-se fixado a altura de tomada de corrente em 15 mm, medido a partir da extremidade inferior do tubo de contato até a superfície da peça-obra, não se levou em consideração que o bocal de duplo fluxo possuía dimensões maiores, obrigando a utilização de um tubo de contato de maiores dimensões.

Em uma terceira etapa de ensaios, verificou-se o comportamento do processo impondo uma redução na velocidade de resposta da fonte (dI/dt 60 KA/s para 27 KA/s) mantendo a velocidade de alimentação do arame em um valor constante de 4,0 m/min. Com exceção a dinâmica da fonte as demais condições de realização dos ensaios se mantiveram inalteradas (tab. 6.1).

Realizados os ensaios, verificou-se que, no aspecto concernente a regularidade, o processo com duplo fluxo apresentou melhores resultados. Nas figuras 6.5a e 6.5b apresenta-se o comportamento do parâmetro DPIP em função da tensão média de soldagem. A figura 6.5a corresponde aos ensaios em que se ajustou a velocidade de alimentação em cada processo de forma a ser obtido uma corrente média de 80 A. A figura 6.5b corresponde aos ensaios onde se fixou a velocidade de alimentação do arame em 4.0 m/min.

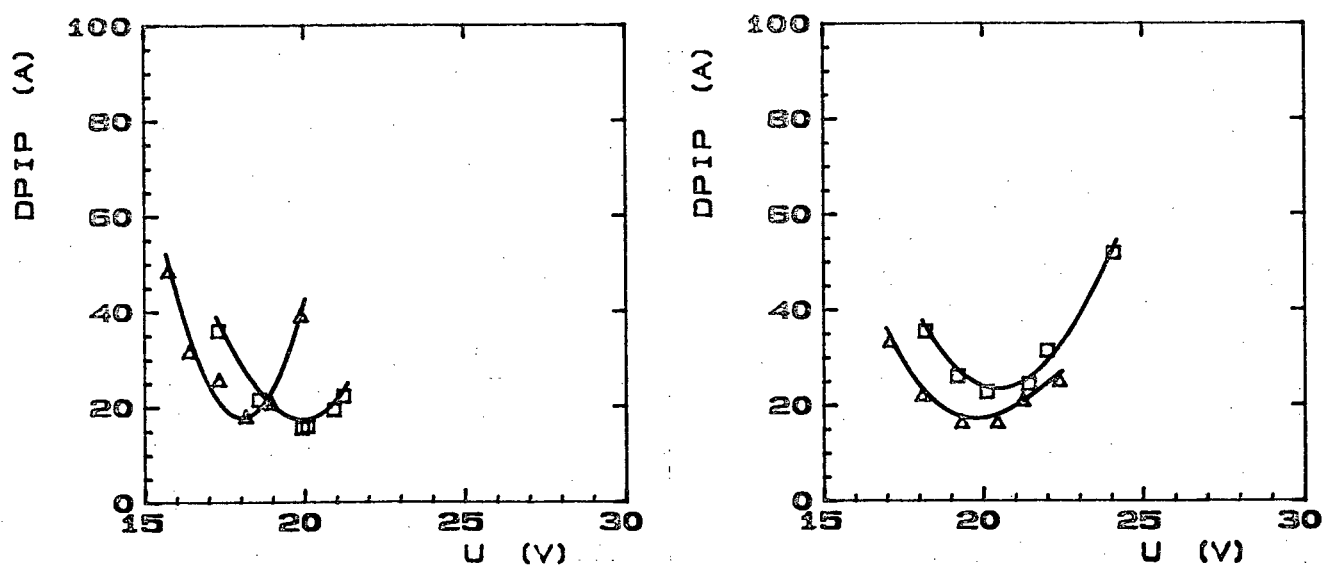


Figura 6.5 - Distribuição de DPIP em função da tensão média de soldagem (U). a) I_m : 80 A; b) V_a : 4m/min. (dI/dt : 60 KA/s). Processos: Δ MAGDF; \square MAG/C25.

Para os ensaios em que se fixou a corrente média, o nível de regularidade na transferência se manteve praticamente constante, apesar do processo MAGDF operar com velocidade de alimentação do arame superior e ajuste de tensão inferior aqueles utilizados no processo MAG/C25. Na tabela 6.3 são apresentados os valores (médios) dos parâmetros de transferência encontrados em cada um dos processos.

	U(V)	MP(A)	TMT(ms)	TMC(ms)	DM(mm)
MAG/C25	19.8	216.2	15.6	2.4	1.1
MAGDF	18.1	215.4	25.56	2.5	1.2

Tabela 6.3- Valores (médios) dos parâmetros de transferência encontrados em cada processo. Variável de análise :
Im: 80 A.

Para os ensaios em que se fixou a velocidade de alimentação do arame em 4.0 m/min obteve-se uma indicação de maior regularidade de transferência para o processo MAGDF (fig. 6.5b). Este fato pode ser constatado pelo registro fotográfico contido na figura 6.6. Apesar da qualidade superficial apresentada pelos cordões ser plenamente aceitável, a produção de salpicos no processo MAG/C25 atingiu proporções superiores a encontrada no processo com duplo fluxo (fig. 5.11c). Esta diferença pode ser avaliada pela maior quantidade de partículas soldadas a superfície da peça-obra. Na tabela 6.4 são apresentados os valores (médios) dos parâmetros de transferência encontrados em cada um dos processos. Embora a tensão média de soldagem seja inferior, para a mesma velocidade de alimentação do arame a transferência metálica no processo MAGDF se deu com gotas de maior volume em relação as gotas formadas em atmosfera de C25.

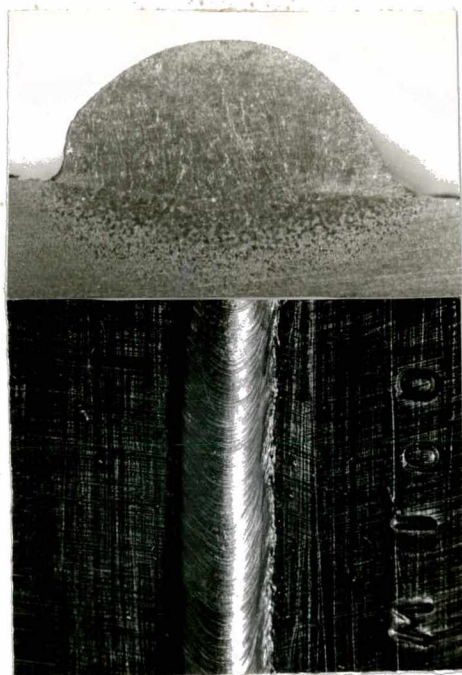


Figura 6.6 - Aspecto do cordão depositado pelo processo MAGDF.
I: 110 A; U: 19.4 V; dI/dt 60 kA/s.

	U(V)	MP(A)	TMT(ms)	TMC(ms)	DM(mm)
MAG/C25	20.1	233.3	12.8	2.5	1.2
MAGDF	19.4	241.5	20.3	2.6	1.3

Tabela 6.4 - Valores (médios) dos parâmetros de transferência encontrados em cada processo. Variável de análise :
 V_a 4 m/min.

Ao se impor à fonte uma resposta dinâmica mais lenta, encontrou-se uma redução sensível na produção de salpicos. Nesta situação, o processo com duplo fluxo apresentou maior regularidade de transferência (fig. 6.7). Na figura 6.8 é apresentada macrografia de cordão de solda obtido nesta condição de ensaio.

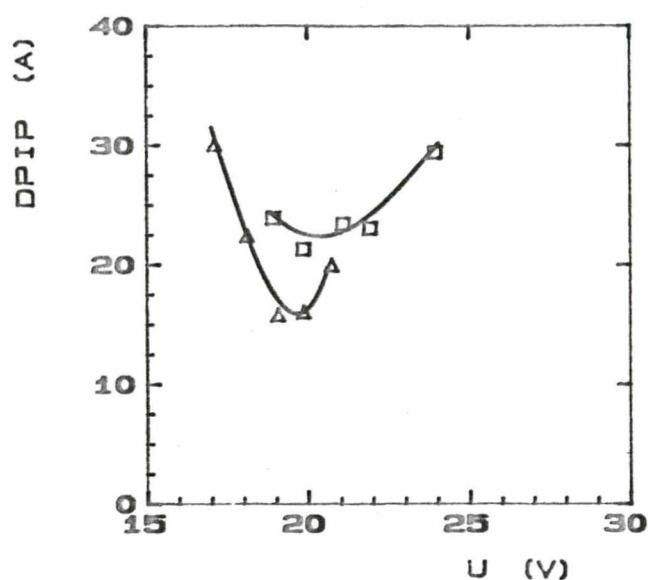


Figura 6.7 - Distribuição de DPIP em função da tensão média de soldagem (U). V_a : 4m/min. dI/dt : 27 kA/s. Processos: Δ MAGDF; \square MAG/C25.

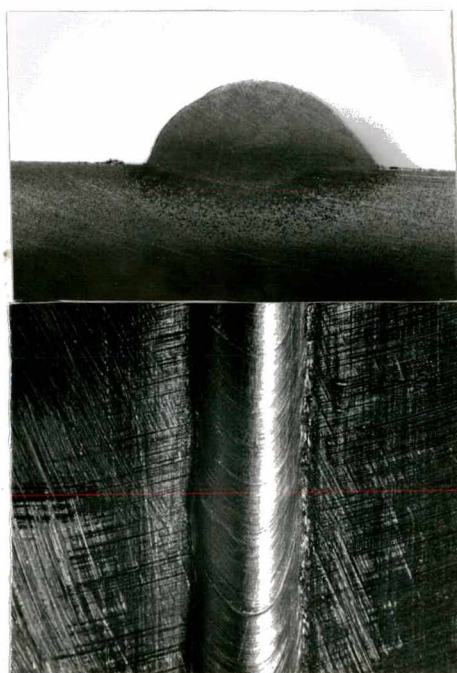


Figura 6.8 - Aspecto do cordão depositado pelo processo MAGDF. I: 110 A; U: 19.3 V; dI/dt 27 kA/s.

Apesar do acabamento superficial ser equivalente, os cordões apresentaram geometrias distintas. No que se refere a penetração, os cordões obtidos pelo processo MAGDF resultaram em baixa solubilização do metal de base (figs. 6.6 e 6.8). Para as condições de ensaio, o processo MAG propiciou cordões com maior penetração (figs. 5.11 e 5.24). Acredita-se que esta diferença não resulte exclusivamente da diferença entre os valores de tensão e corrente de soldagem. Em termos de aporte térmico, a diferença entre as condições de ensaio analisadas atinge níveis de grandeza da ordem de 10 %.

Apesar de tensão e corrente de soldagem exercerem influência sobre a transferência de calor à peça, acredita-se que a baixa penetração dos cordões referentes ao processo MAGDF surja como decorrência da mudança na composição da atmosfera protetora que envolve o eletrodo. Ao analisar a origem do calor necessário à fusão do metal de base tem-se que:

a) a energia térmica resultante no cátodo provém , essencialmente, do calor contido nas gotas. Considerando esta fonte de calor, a transferência sob proteção de CO_2 possui maiores condições de fornecer calor para a fusão do metal de base em função de produzir gotas com maior temperatura [19] e a uma frequência superior a obtida sob proteção composta por duplo fluxo;

b) somente com base no calor liberado pelo arco voltaico, a parcela gerada por efeito joule dos pontos catódicos produz mais calor do que o bombardeamento iônico. [76]. Desta forma, o maior período de arco encontrado no processo com duplo fluxo não compensa o aumento no número de pontos catódicos que se formam

em atmosfera composta por C25.

c) existência de uma fonte adicional de calor resultante da recombinação da molécula de CO, reação esta que ocorre próximo a superfície do cátodo [29].

Considerando as fontes de geração de calor, o processo MAG protegido por atmosfera composta pela mistura de 75% Ar/25% CO₂ possui maiores condições de transferir energia de fusão ao metal de base do que o processo protegido por um duplo fluxo.

Para verificar o efeito do aumento no apórté térmico, realizou-se cordões de solda elevando a tensão e corrente média de soldagem para 22 V e 160 A. Apesar deste aumento, a penetração do cordão depositado ainda se manteve inferior aos aquela obtida com atmosfera da proteção composta por C25.

De uma maneira geral, os resultados encontrados se mostraram coerentes com aqueles apresentados por Masumoto [74]. Apesar desta referência conter resultados obtidos para valores de corrente média entre 200 e 500 A e composição da atmosfera de 25 % AR / 75 %CO₂, em transferência por curto-circuito a penetração dos cordões se mostrou extremamente pequena. Somente para combinações entre tensão e corrente que resultaram em arcos mergulhados na poça de fusão se encontrou aumento efetivo da penetração.

Diante dos mecanismos passíveis de utilização para aumentar a penetração, promover um aumento na proporção de CO₂ na atmosfera não resulta em gotas com temperaturas equivalentes aquelas encontradas com C25. O aumento de CO₂ na atmosfera pode tornar-se importante na produção de cordões com maior molhabilidade, permitindo melhorar a qualidade superficial. Para

o processo com duplo-fluxo, acredita-se que o aumento efetivo da penetração só poderá ser obtido com o aumento da densidade de corrente, de maneira a deslocar o processo para combinações que resultem em transferência por projétil.

Pelos resultados obtidos, considera-se limitada a utilização do processo com duplo-fluxo em condições de transferência por curto-circuito. Neste modo de transferência a penetração na peça-obra adquire proporções muito pequenas. A utilização de atmosfera composta por C25 permite obter maior solubilização do metal de base. Apesar da utilização desta atmosfera resultar no aparecimento de uma quantidade maior de salpicos, pode-se obter uma minimização desta produção atuando sobre a velocidade de resposta da fonte. Desta maneira, produz-se cordões com maior largura e penetração, e minimizando a presença de partículas soldadas à superfície da peça.

Deve-se observar que estes resultados tornam-se limitados pela geometria do bocal utilizado para os ensaios. Apesar de se encontrar resultados semelhantes na literatura, não se sabe, ao certo, a influência que o dimensionamento dos bocais exerce sobre o efeito de proteção da extremidade do eletrodo.

7 CONCLUSÃO

No seu aspecto geral, o trabalho alcançou seus objetivos uma vez que viabilizou-se a execução dos registros fotográficos do arco voltaico e transferência metálica no processo MIG/MAG. De forma similar, no aspecto conernente a determinação das curvas características estáticas, apresentou-se a aplicabilidade de uma metodologia fundamentada em parâmetros indicativos da regularidade da transferência para permitir a definição destas relações paramétricas.

Em termos específicos, pode-se concluir que:

a) Quanto ao sistema ótico e procedimentos para execução dos registros fotográficos:

- a utilização de uma fonte laser de 10 mW, em detrimento a lasers de menor potência (1-5 mW), permitiu obter uma melhora significativa na qualidade da imagem dos registros fotográficos;

- apesar dos filtros de densidade neutra se constituírem na opção preferencial para este tipo de aplicação, a utilização de polarizadores para a atenuação da luminosidade do arco pode ser considerada como alternativa válida;

- verificou-se que a ampliação da imagem projetada sobre a película fotográfica exerce influência decisiva sobre a qualidade da imagem. Ampliações pequenas provocam redução no contraste, impossibilitando a observação do arco voltaico MIG/MAG;

- em transferência por curto-circuito, a repetibilidade da qualidade é limitada pelas variações dinâmicas nas características do arco voltaico;

- para o registro do arco TIG, a estabilidade espacial e regularidade na emissão de luz resulta em repetibilidade nas características da imagem. Registros fotográficos com períodos de exposição crescentes conduzem a um crescimento exponencial nas dimensões da imagem.

b) Quanto a determinação das curvas características estáticas:

- o erro advindo em considerar o comprimento do arco como o afastamento entre a linha de fusão e a superfície da peça-obra não justifica a adoção de uma definição mais complexa para esta grandeza;

- em transferência por curto-circuito, a grandeza comprimento do arco esta limitada a uma faixa de valores que permitem manter o processo de soldagem dentro de condições de regularidade e geometria aceitáveis;

- a determinação do comprimento do arco pode ser desprezada, sendo preferível a substituição das curvas características estáticas por relações paramétricas definidas com base na regularidade da transferência;

- para a quantificação da regularidade o parâmetro DPI mostrou-se ser o de maior aplicabilidade, visto a correlação obtida entre os valores numéricos e a qualidade resultante no cordão.

c) Quanto ao processo MAG com duplo fluxo:

- sem conhecer os erros advindos da determinação da distribuição espacial do arco voltaico com base em registros fotográficos torna-se inviável proceder qualquer análise sobre a existência do

efeito de constricção induzido pela presença de CO_2 como fluxo externo;

- a utilização do processo MAG com duplo fluxo em condições de transferência por curto-circuito é limitada em função da penetração do cordão adquirir proporções muito pequenas. A utilização de atmosfera composta por mistura de argônio/ CO_2 (75% / 25%) permite obter maior solubilização do metal de base;

- embora a utilização de atmosfera composta por mistura resulte em menor regularidade, atuando sobre a combinação de parâmetros/variáveis há condições de produzir cordões com maior largura e penetração, e com a presença mínima de salpicos.

7.1 SUGESTÕES PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Como sugestões para desenvolvimentos de trabalhos futuros propõem-se:

a) quanto ao sistema ótico, considera-se que seu desenvolvimento futuro seja direcionado no sentido de procurar sua integração ao SISDATASOLDA de forma a viabilizar a aquisição simultânea de imagem e dos valores instantâneos das variáveis elétricas do processo de soldagem;

b) Quanto aos procedimentos para o registro fotográfico do arco voltaico, os estudos deverão ser desenvolvidos no sentido de procurar criar uma metodologia que permita correlacionar período de exposição e dimensões da imagem as várias condições de operação do arco. Paralelamente a este estudo, deve-se procurar analisar a viabilidade de implementar uma metodologia que permita determinar, ao menos de forma aproximada, as dimensões reais do arco.

c) Quanto a determinação das relações paramétricas visando definir a faixa operacional considera-se importante que se estendam os ensaios para novos valores de diâmetros e extensão de eletrodo, assim como velocidade de soldagem, afim de verificar o comportamento resultante ao serem introduzidas variações nestes parâmetros. Uma proposta que poderá ser definida consiste na realização de ensaios em chapas finas e preenchimento de juntas, de forma a permitir a análise do comportamento da metodologia em situações de maior aplicação na soldagem.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ROGERS, P. - Synergic MIG in perspective. Metal Construction, v. 17, n. 9, p. 602-604, 1985.
- [2] STENBACKA, N., PERSSON, K. - Shielding gases for gas metal arc welding. Weld. J., v. 68, n. 11, p. 41-47, 1989.
- [3] ALLUM, C. J. - Welding technology data: pulsed MIG welding. Welding and Metal Fabrication, jan./feb., p. 24-30, 1985.
- [4] AMIM, M. and NASSER-AHMED - MIG power sources with one-knob control. Metal Construction, v. 18, n. 7, p. 418-424, 1986.
- [5] PAN, J. L. - Welding arc control. The fourth international symposium of the Japan Welding Society, Osaka, p. 23-28, nov., 1982.
- [6] AMIM, M. and NASSER-AHMED - Synergic control in MIG welding, part 2: power-current controllers for steady DC arc operation. Metal Construction, v. 19, n. 6, p. 331-340, 1987.
- [7] AMIM, M. and NASSER-AHMED - Linear voltage-current controller for steady DC open arc and short-circuiting arc operation. Metal Construction, v. 19, n. 9, p. 484, 486-489, 1987.

- [8] DUTRA, J. C. - Procedimento computadorizado de determinação, seleção e controle de variáveis na soldagem MIG/MAG. Tese de doutorado, UFSC, 1990.
- [9] AMIM, M. - Synergic Control in MIG Welding - Part 1: Parametric Relationships for Steady DC and Short-Circuiting Arc Operation. Metal Construction, v. 19, n. 1, p. 22-28, 1987.
- [10] CHEN, J. H. *et al* A study of the mechanism for globular metal transfer from covered electrodes. Weld. J., v. 68, n. 4, p. 145s-150s, 1989.
- [11] DORN, L. and RIPPL, P. - Development of a system for process data acquisition and process analysis during arc welding. Schweissen and Schneiden, v. 34, n. 4, p. 195-199, 1982.
- [12] KOHN, G. and SIEWERT, T. A. - The effect of power supply response characteristics on droplet transfer of GMA welds. Proc. of the ASM Internl. conf. on trends in welding research, Glattburg, Tenn., p. 299-302, 1987.
- [13] HILLER, W. J. and KOWALEWSKI, T. A. - Application of the frame - transfer charge-coupled device for high speed imaging. Optical Engennering, v. 28, n. 2, p. 197-200, 1989.
- [14] WELDING HANDBOOK. American Welding Society, ed. Leonard P. Connor, 8 ed., v.1, 1987.

[15] GUILÉ, A. E. - Electric Arcs: Their Electrode Process and Engineering Applications. IEE Proc., vol 131, Pt A, n 7, p. 450-480, 1984.

[16] EDELS, H. - Properties and Theory of Electric Arcs. Proc. IEE, 108 A, n. 37, p. 55-69, 1961.

[17] WEGRZYN, J. - Arc Properties in Manual Welding with Coated Electrodes. Metal Construction, v. 12, n. 9, p. 433-436, 1980.

[18] MATSUNAWA, A. and NISHIGUCHI, K. - Arc characteristics in high pressure argon atmospheres. International conference on arc physics and weld pool behaviour, The Welding Institute, Cambridge, p. 67-77, 1980.

[19] COUTO, J. G. V. - Modelos de abertura de arco elétrico para processos semi-automáticos, sob proteção gasosa de argônio (MIG), misturas ricas em argônio (MIG/MAG) e de gás carbônico CO₂ (MAG). XV ENTS, ABS, Sao Paulo, Vol. 1, p. 501-519, 1989.

[20] REED-HILL, R. E. - Princípios de metalurgia física. Ed. Guanabara 2, 2ª ed., 1982.

[21] LESNEWICH, A. - Electrode Activation for Inert-Gas-Shielded Metal-arc Welding. Weld. J. v. 12, n. 34, p. 1167-1178, 1955.

[22] WATANABE, I. and KOJIMA, T. - The arc phenomenon in large current MIG welding. *Ibidem* [18], p. 177-192.

[23] GUILLE, A. E. - Process at cathode roots on nonrefractory metals having films of their own oxide. *Ibidem* [18], p. 79-86.

[24] ESSERS, W. G. and VAN GOMPEL, M. - Arc Control With Pulsed GMA Welding. *Weld. J.*, v. 63, n. 6, p. 26-32, 1984.

[25] LANCASTER, J. F. - The Physics of Fusion Welding - Part 2: Mass Transfer and Heat Flow. *IEE Proc.*, vol 134, Pt B, n 6, p. 297-316, 1987.

[26] PATTON, W. J. - The science and practice of welding. Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1967.

[27] QUINTINO, L. - Fusion characteristic in pulsed GMAW of mild steel. PhD. thesis, Cranfield Institute of Technology, School of Industrial Science, 1986.

[28] SMATI, Z. - Automatic Pulsed MIG Welding. *Metal Construction*, v. 18, n. 1, p.38R-44R, 1986.

[29] DORN, L. and SCHULTZE, F. - Active-Gas Metal-Arc Welding under Carbene Dioxide With Pulsed Arc and Transistor Power Supply - Analyses of Arc Behaviour and Material Transfer". *Schweissen und Schneiden Transl.*, v.40, n. 7, p. E102-E106/332-338, 1988.

[30] NEEDHAM, J. C. and CARTER, A. W. - Arc and transfer characteristics of the steel/CO₂ welding process. *Brit. weld. J.*, v. 14, n. 10, p. 533-549, 1967

[31] HILTUNEN, V. and PIETIKAINEN, J. - Investigations and observations on material transfer in metal-inert-gas (MIG) welding. *Ibidem* [18], p. 147-164.

[32] HOWDEN, D. G. - Mass Transfer of Metal Vapor and Anode Temperatures in Arc Melting. *Weld. J.*, v. 48, n. 3, p. 125s-132s, 1969.

[33] WAZINSKI, J. H. and VAN DER HEUVEL, P. - Experimental investigation of the forces acting on a drop of weld metal. *Weld. J.*, v. 61, n. 8, p. 269s-282s, 1982.

[34] DORN, L., RIPPL, P. and SCHOEFER, E. - An examination of metal transfer during shielded metal-arc welding under mixed gas and carbon dioxide. *Schweissen and Schneiden Transl.*, v. 34, n. 8, p. E146-149/378-385, 1982.

[35] GLICKSTEIN, S. S. - Arc modelling for welding analysis. *Ibidem* [18], p. 1-6.

[36] LANCASTER, J. F. - Metal transfer in fusion welding. *Ibidem* [18], p. 135-146.

[37] WASZINK, J. H. and PIENA, M. J. - Experimental investigations of drop detachment and drop velocity in GMAW. *Weld. J.*, v. 65, n. 11, p. 289s-298s, 1986.

[38] WASZINK, J. H. and GRAAT, L. H. J. - Experimental investigation of the forces acting on a drop of weld metal. *Weld. J.*, v. 62, n. 4, p. 108s-116s, 1983.

- [39] UEGURI, S., HARA, K. and KOWARA, H. - Study of metal transfer in pulsed GMA welding. Weld. J., v. 64, n. 8, p. 242s-250s, 1985.
- [40] AMSON, J. C. - Lorentz force in molten tip of an arc electrode. Brit. J. Appl. Phys., v. 16, p. 1169-1179, 1965.
- [41] MILNER, D. R. and APPS, R. L. - Introduction to welding and brazing. Pergamon Press Ltda., 1 ed., London, 1968.
- [42] HALLIDAY, D. e RESNICK, R. - Fisica, v.3, LTC editora S.A., 3 ed., 1980.
- [43] SMITH, A. A. - Characteristics of the short arcing CO₂ shielded arc. Brit. Weld. J., v. 10, n. 10, p. 571-586, 1963.
- [44] LIU, S. and SIEWERT, T. - Metal transfer in gas metal arc welding: droplet rate. Weld. J., n. 2, v. 68, 52s-59s, 1989.
- [45] ZARUBA, I. I. - The Nature of Short-circuits of the CO₂ Welding Arc. Autom. Weld. v.26, n. 5, p. 14-17, 1973.
- [46] DORN, L. and RIPPL, P. - Influence of Power Source in Arc Welding - Statistical Behaviour", Schweissen und Schneiden Transl., v. 38, n. 6, p.E88-E91/267-271, 1986.
- [47] DORN, L. and RIPPL, P. - Welding Current Sources and Arc Welding - Dynamic Behaviour During Inert-Gas Metal-Arc Welding. Schweissen und Schneiden Transl., v.40, n.11, p. E191-E192/558-561, 1988.

- [48] EUROPEN PATENT APPLICATION - EP 0 273 540 A1, 1987
- [49] OGASAWARA, T. *et al* - A Power Source for Gas Shielded Arc Welding With New Current Waveforms. *Weld. J.*, v.63, n. 3, p. 57-63, 1987.
- [50] BLESS, J. C. - Drop Transfer in Short-Circuit Welding. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol 7, p. 526-539, 1974.
- [51] LEBEDEV, V. K., ZARUBA, I.I. and ANDREEV, V. V. - Conditions of the Formation of a Liquid Bridge in the Droplet Transfer of Metal With Short-Circuiting of Arc Gap. *Autom. Weld.*, v.28, n. 9, p. 1-3, 1975
- [52] SLINEY, D. H. *et al* - Transparent welding curtains. *Weld J.*, v. 61, n. 5, p. 17-24, 1982.
- [53] KIM, W., ALLEMAND, C. and EAGAR, T. W. - Visible light emissions during GTAW and it's application to weld image improvement. *Weld. J.*, v. 66, n. 12, p. 369s-373s, 1987.
- [54] MELLES GRIOT. Optical Guide 4. Melles Griot, 1988.
- [55] FU, X., USHIO, M. and MATSUDA, F. - Melting characteristic of some steel and aluminium alloy wires in GMA welding. *Trans. of JWRI*, v. 12, n. 2, p. 7-13, 1983.
- [56] ALLEMAND, *et al*. A method of filming metal transfer in welding arcs. *Weld. J.*, v. 64, n. 1, p. 45-47, 1985.

- [57] HEDGECOE, J. and FORD, L. Manual do Fotógrafo, ed. JB do Brasil Ltda., 1982.
- [58] KALLARD, T. - Exploring laser light. Ed. Optosonic press, U.S.A., 1977.
- [59] OKADA, T., YAMAMOTO, H. and HARADA, S. - Observation of the shielding gas flow pattern during arcing by the use of a laser light source. *Ibidem* [18], p.203-213.
- [60] Spectra-Physics. Catálogo Técnico.
- [61] PETERS, H. G. - Otimização da estabilidade espacial do raio gerado pelo laser de hélio-neônio. Dissertação de mestrado, UFSC, 1976.
- [62] ARECCHI, F. T. and SCHULZ-DUBOIS, E. C. - Laser Handbook. Ed. North-Holland Publishing Company, Great Britain, 1972.
- [63] LIGHT, W. - Non-contact optical position sensing using silicon photodetectors. United detector technology, april, 26 p., 1982.
- [64] GLICKSTEIN, S. S. - Temperature measurements in free burning arc. Weld. Research Supplement, n 9, p. 222s-229s, 1976.
- [65] WASZINSKI, J. H. and HEUVEL, G. - Measurements and calculations of the resistance of wire extension in arc welding. *Ibidem* [18], p. 227-239.
- [66] TUTHILL, R. W. - "Arc Characteristics for Consumable-Electrode Gas-Shielded Welding", Weld. J. v.33, n.2, p. 128-132, 1954.

[67] BOUGHTON, P. and MACGREGOR, G. - " Control of Short Circuiting in MIG-Welding ", The Weld. Inst. P57/72, 1972

[68] LUCAS, W. and BUTTLER, M. - An evaluation of minicomputer techniques for data acquisition and analysis in arc welding process research. Weld. Inst. members report, 134/1981.

[69] MITA, T., SAKABE, A. and YOKOO, T. - "Quantitative Estimates of Arc Stability for CO₂ Gas Shielded Arc Welding ", Weld. Int., n 2, p. 152-159, 1988.

[70] ZARUBA, I. I. - The nature of short-circuits of the CO₂ welding arc. Autom. Weld., v.26, n. 5, p. 14-17, 1973.

[71] ESSERS, W. G. and WALTER, R. - Some aspects of the penetration mechanisms in metal-inert-gas (MIG) welding. *Ibidem* [18], p. 289-300.

[72] ESSERS, W. G. and WALTER, R. - Heat transfer and penetration mechanisms with GMA and plasma-GMA welding. Weld. J., v. 60, n. 2, p. 37s-42s, 1981.

[73] BOHME, D. and HEUSER, H. - " Gas Shielded Metal-Arc Welding With Two Separately Fed Shielding Gas - Flow Behaviour and Influence of the Argon Proportion on the Penetration Conditions ", Schw. und Schn. Transl. 2, 1983 - pp. E25-E28/82-87

[74] MASUMOTO, I., KUTSUNA, M. and ABRAHAM, M. - "Metal Transfer and Spatter Loss in Double Gas Shielded Metal Arc Welding", Trans. Japan Weld. Society, vol 19, n 2, p. 38-44, 1988.

[75] CUNHA, P. C. e POPE, A. M. - Fratura frágil de juntas soldadas., Módulo: soldagem II. PETROBRAS.

[76] GUILLE, A. E. - Joule Heating in Emitting Sites on Various Nonrefractory Arc Cathodes. IEE Proc., vol 127, Pt A, n. 7, p. 452-457, 1980.